

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Nikola Kovačić**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Doc. dr. sc. Irena Žmak, dipl. ing.

Student:

Nikola Kovačić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svojoj mentorici doc. dr. sc. Ireni Žmak na strpljenju, pomoći i vodstvu pri izradi ovog diplomskog rada. Srdačno zahvaljujem g. Kerimu Mujkiću, dipl. ing. što mi je omogućio izradu rada. Zahvaljujem Alenu Baueru, dipl. ing. na susretljivosti i ustupljenim materijalima te svim zaposlenicima tvrtke Spectra media d.o.o.

Najveće hvala mojim roditeljima na razumijevanju i podršci tokom studiranja.

Nikola Kovačić

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Nikola Kovačić**

Mat. br.: 0035168846

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izbor materijala za oplatu mlina za usitnjavanje pri recikliranju električnog i elektroničkog otpada**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Materials selection for the plating mill for electrical and electronic waste recycling**

Opis zadatka:

Gospodarenju otpadom danas se, kako u svijetu, tako i u Hrvatskoj posvećuje velika pozornost. Kako bi se izbjeglo odlaganje otpada u okoliš, traže se novi načini recikliranja otpada. Time se također čuvaju zalihe primarnih izvora sirovine te štedi energija pri dobivanju materijala iz sekundarnih sirovina.

Mlin čekićar dio je postrojenja za recikliranje električnog i elektroničkog otpada, a služi za usitnjavanje. Pravilnim izborom materijala u fazi projektiranja mlina čekićara moguće je proizvesti kvalitetniji proizvod uz bolja uporabna svojstva, privlačan izgled, nižu cijenu i veću dobit.

U okviru ovog diplomskog rada potrebno je:

1. analizirati dosadašnje izvedbe oplata mlina čekićara
2. opisati metodologiju izbora materijala
3. odrediti zahtjeve za izbor materijala oplata mlina čekićara
4. kvantitativnim metodama izabrati zadovoljavajuće materijale
5. rangirati zadovoljavajuće materijale po odabranoj funkciji cilja
6. predložiti optimalan materijal.

Zadatak zadan:

12. ožujka 2015.

Rok predaje rada:

14. svibnja 2015.

Predviđeni datum obrane:

20., 21. i 22. svibnja 2015.

Zadatak zadao:



Doc. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednik Povjerenstva:



Prof. dr. sc. Franjo Cajner

**SADRŽAJ**

<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>III</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>IV</b>
<b>POPIS OZNAKA .....</b>	<b>V</b>
<b>SAŽETAK .....</b>	<b>VI</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>VII</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. SPECTRA MEDIA D.O.O .....</b>	<b>2</b>
2.1. EE otpad.....	3
2.2. Oporaba ( reciklaža ) EE- otpada.....	3
<b>3. USITNJAVANJE ČVRSTIH MATERIJALA.....</b>	<b>6</b>
3.1. Drobilice.....	7
3.2. Mlinovi.....	8
<b>4. OPLATA MLINA ČEKIĆARA.....</b>	<b>11</b>
<b>5. IZBOR MATERIJALA.....</b>	<b>14</b>
5.1. Faze razvoja proizvoda .....	14
5.2. Metodologija izbora materijala .....	16
5.3. Osnovne skupine kriterija za izbor materijala.....	18
<b>6. METODE IZBORA MATERIJALA.....</b>	<b>21</b>
6.1. Kvantitativne metode izbora materijala .....	23
6.1.1. Karte svojstava materijala.....	25
6.1.2. Pokazatelji vrednovanja .....	26
6.1.3. Metoda najmanjih odstupanja od traženih .....	27
6.1.4. Metoda utjecajnosti svojstava .....	29
6.1.5. Metoda graničnih vrijednosti .....	31
6.1.6. Pahl-Beitzova metoda ocjena.....	32
6.1.7. Faktor uporabne valjanosti sveden na troškove .....	32
<b>7. ANALIZA ZAHTJEVA .....</b>	<b>34</b>
<b>8. ANALIZA SVOJSTVA MATERIJALA ZA KARAKTERISTIČNE     ZAHTJEVE I KRITERIJE [7] .....</b>	<b>41</b>
8.1. Otpornost na trošenje .....	41
8.1.1. Analiza sustava i procesa trošenja .....	42
8.1.2. Predizbor varijanti – izbor mogućih rješenja .....	43
8.1.3. Laboratorijska ispitivanja varijanti .....	44
8.1.4. Ispitivanje izabranih varijanti rješenja u eksploataciji .....	45
8.2. Otpornost na krhki lom – žilavost.....	45
8.1.5. Ispitivanja u uvjetima udarnog opterećenja .....	46
8.1.6. Određivanje veličina iz mehanike loma.....	47
8.1.7. Žilavost metala.....	51

---

8.1.8. Žilavost polimernih materijala .....	53
8.1.9. Žilavost konstrukcije keramike .....	53
8.3. Izbor postupaka zavarivanja.....	54
8.1.10. Zavarljivost metalnih materijala .....	54
8.1.11. Postupci zavarivanja .....	55
8.4. Cijena materijala .....	56
<b>9. IZBOR MATERIJALA.....</b>	<b>57</b>
9.1. Analiza materijala pomoću metode utjecajnih svojstava .....	68
<b>10. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>72</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>73</b>

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Postrojenje za recikliranje EE otpada [1] .....	2
Slika 2.	Separirane kuglice [2].....	5
Slika 3.	Čeljusna drobilica [3] .....	8
Slika 4.	Mlin čekićar s osnovnim dijelovima [4].....	10
Slika 5.	Oplata "ribež".....	13
Slika 6.	Oplata "žica" .....	13
Slika 7.	Dijagram toka postupka razvoja proizvoda i izbora materijala [7] .....	16
Slika 8.	Prikaz veze konstrukcijskog oblikovanja, izbora materijala i izbora postupka proizvodnje [7] .....	17
Slika 9.	Primjer dijagrama kod Ashbyjeve metode [8].....	22
Slika 10.	Karta svojstva za gustoću ( $\rho$ ) i modul elastičnosti ( $E$ ) [7].....	26
Slika 11.	Poligoni zahtijevanih svojstava i postojećih svojstava materijala [7] .....	28
Slika 12.	Moguće promjene iznosa trošenja tribosustava s udarnim opterećenjima [9] .....	34
Slika 13.	Jedinični događaj umora površine [9] .....	35
Slika 14.	Hertz-ovo naprezanje [9] .....	36
Slika 15.	Mehanizmi nastajanja početnih pukotina [9] .....	37
Slika 16.	Rabinowitza karta kompatibilnosti [9] .....	39
Slika 17.	Dijagram toka izbora materijala za dijelove tribosustava .....	42
Slika 18.	Ovisnost lomne žilavosti i konvencionalne granice razvlačenja za neke skupine metalnih materijala .....	50
Slika 19.	Utjecaj temperature na udarni rad loma različitih čelika.....	52
Slika 20.	Glavni faktori koji utječu na zavarljivost .....	54
Slika 21.	Dijagram lomna žilavost –cijena [10] .....	57
Slika 22.	Dijagram cijena – lomna žilavost metala i legura [10].....	58
Slika 23.	Dijagram cijena- lomna žilavost materijala koji nisu prošli prvi korak [10] .....	60
Slika 24.	Dijagram cijena- lomna žilavost materijala koji su prošli osnovni kriterij u Ces EduPack-u 2009 na razini 3 [10] .....	61
Slika 25.	Dijagramski prikaz materijala čija je cijena niža od 50 HRK/kg [10] .....	61
Slika 26.	Dijagram tvrdoća- modul elastičnosti [10].....	62
Slika 27.	Dijagramski prikaz materijala čija je vrijednost modula elastičnosti veća od 200 GPa [10].....	62
Slika 28.	Dijagram tvrdoća – modul elastičnosti [10] .....	63
Slika 29.	Dijagram cijena – lomna žilavost * granica razvlačenja [10] .....	65
Slika 30.	Dijagramski prikaz cijena – lomna žilavost * granica razvlačenja materijala koji zadovoljavaju sve kriterije [10] .....	66

## POPIS TABLICA

Tablica 1.	Kemijski sastav čelika oznake X120Mn12 [6].....	13
Tablica 2.	Dominantna svojstva i vrste zaštita za različite mehanizme trošenja.....	44
Tablica 3.	Materijali koji su prošli prvi kriterij u Ces EduPack-u 2009 na razini 2 [10].....	59
Tablica 4.	Nemagnetični materijali za daljnji izbor [10].....	64
Tablica 5.	Vrijednosti svojstava materijala koji zadovoljavaju sve kriterije [10].....	67
Tablica 6.	Srednje vrijednosti svojstava materijala koji zadovoljavaju sve kriterije [10].....	68
Tablica 7.	Rezultati digitalno-logičke metode za zadana svojstva.....	69
Tablica 8.	Izračunate vrijednosti indeksa radne karakteristike $V_r$ .....	70
Tablica 9.	Vrijednosti parametra vrednovanja materijala $M$ .....	71



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$a$	mm	Duljina ureza
$B_i$		Faktor važnosti za svojstva
$C$		Cijena
$C_e$		Ugljični ekvivalent
$D$	mm	Promjer
$E$	$\text{N/mm}^2$	Modul elastičnosti
$E_{\check{c}}$	J	Energetski potencijal čestice
$f$		Omjer granice razvlačenja i radnog naprezanja
$F_j$		Funkcija cilja
$F$	N	Sila (opterećenje)
HV		Tvrdoća po Vickersu
$K_{IC}$	$\text{Nmm}^{-3/2}$	Lomna žilavost
KU, KV	J	Udarni rad loma za epruvetu s "U" ili "V" urezom
$m$	kg	Masa
$M$		Pokazatelj vrednovanja materijala
$n$		Broj svojstava
$n_{kr}$	$\text{min}^{-1}$	Kritična brzina vrtnje
$p$	$\text{N/mm}^2$	Tlak, površinski pritisak
$R_m$	$\text{N/mm}^2$	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	$\text{N/mm}^2$	Konvencionalna granica razvlačenja
$T$	°C, K	Temperatura
$v$	m/s	Brzina
$V$	$\text{m}^3$	Volumen
$V_r$		Indeks radne karakteristike
$\alpha$		Korekcijski faktor za geometriju i položaj pukotine
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća
$\sigma$	$\text{N/mm}^2$	Naprezanje

## SAŽETAK

EE otpad postao je vrlo velik problem zbog činjenice da se ubrzanim razvojem tehnologije upotrebljava sve veća količina električnih i električkih uređaja. Zbog toga se sve više pažnje posvećuje recikliranju takve vrste otpada. Da bi se što lakše i učinkovitije obavio proces recikliranja potrebno je razvijati opremu za recikliranje. Kvalitetu opreme možemo poboljšati i pravilnim izborom materijala.

U ovom radu analizira se metodologija i glavni kriteriji izbora materijala oplata mlina čekićara za usitnjavanje električkog i elektroničkog otpada pri recikliranju. Rad je koncipiran u nekoliko cjelina. U uvodu je ukratko opisan postupak recikliranja EE otpada kao i postupak usitnjavanja čvrstih materijala. Također su analizirani materijali koji se danas koriste za oplatu mlina čekićara. U drugoj cjelini nalazi se metodologija izbora materijala i pregled metoda koje se najčešće koriste kod izbora materijala. U završnom djelu rada analizirana su najvažnija svojstva materijala oplata mlina čekićara. Prema analiziranim svojstvima napravljen je predizbor materijala pomoću programskog paketa Ces EduPack 2009. Odabrani materijali rangirani su metodom utjecajnih svojstava te je odabran optimalan materijal.

Ključne riječi: recikliranje, EE otpad, oplata, mlin čekićar, usitnjavanje, izbor materijala

## SUMMARY

EE waste has become a very big problem because of the fact that the rapid development of technology uses huge amounts of electrical and electronic devices. Therefore, more attention is paid to recycling of such waste. In order to recycle more easily and efficiently, recycling process needs to develop equipment for recycling. The quality of the equipment can be improved by proper selection of materials.

This work analyzes the methodology and the main criteria for the selection of materials for the plating hammer mill for shredding electric and electronic waste during recycling. The work is divided into several sections. The introduction describes the process of recycling electronic waste, as well as the shredding of solid materials. Also, materials used today for the plating a hammer mill are analyzed. The second part describes the methodology for the selection of materials and methods that are commonly used in the selection of materials are presented. In the final part of the thesis the most important properties of the material for the plating hammer mill are analyzed. According to the important material characteristics a pre-selection of materials is made using the software package Ces EduPack 2009. Selected materials are ranked using the influential properties method, and the optimal material is selected.

Key words: recycling, EE waste, plating, hammer mill, shredding, material selection

## 1. UVOD

Gospodarenju otpadom danas se u svijetu posvećuje velika pozornost. Kako bi se izbjeglo odlaganje otpada u okoliš, traže se novi načini ponovne uporabe otpada. Ponovnom uporabom otpada, odnosno recikliranjem, čuvaju se zalihe primarnih izvora sirovine (blizu 40 % svjetske proizvodnje bakra, i 55 % čelika ostvaruje se recikliranjem), štedi se energija pri dobivanju materijala iz sekundarnih sirovina (u odnosu na dobivanje iz primarnih sirovina uštede iznose oko 74 % kod željeza i čelika, 85 % kod bakra te 95 % kod aluminija) i štiti se okoliš smanjivanjem količine deponiranog otpada u okolinu.

Tvrtka Spectra Media d.o.o prepoznala je važnost recikliranja otpada i 2009. godine otvoreno je postrojenje za recikliranje električnog i elektroničkog otpada. Postrojenje za recikliranje može godišnje obraditi 18.000 tona EE otpada u jednoj smjeni. Dio tog postrojenja je i mlin čekićar za usitnjavanje metalnih i nemetalnih čestica. U ovom radu analizirani su zahtjevi za izbor materijala oplata tog uređaja te je kvantitativnom metodom predložen optimalni materijal. Pravilnim izborom materijala u fazi projektiranja i konstruiranja proizvoda moguće je proizvesti kvalitetniji proizvod uz bolja uporabna svojstva, dopadljivi izgled, nižu cijenu proizvoda, te što veću dobit. Zbog svega navedenog, izbor materijala danas je mnogo kompleksniji problem nego što je bio u prošlosti.

## 2. SPECTRA MEDIA D.O.O

Spectra media d.o.o. posluje u kontinuitetu od 1985. godine, a stalnim se napretkom razvila iz obrta u uspješno poduzeće koje danas zapošljava 130 djelatnika. Sjedište firme nalazi se u Zagrebu u Gradišćanskoj ulici 20. Centralno skladište je u Strmcu Samoborskom, a pogoni za recikliranje i obradu elektroničkog i električnog otpada su u Virovitici i u Donjoj Bistri. Osnovna djelatnost tvrtke je skupljanje, oporaba i zbrinjavanje EE otpada. Od 2007. godine tvrtka je državni koncesionar za recikliranje i oporabu EE otpada. Sekundarna djelatnost tvrtke je zastupanje, veleprodaja, servis i montaža elektroničkih uređaja.

Postrojenje za recikliranje (oporabu) električnog i elektroničkog otpada (slika 1) u Donjoj Bistri kraj Zagreba službeno je otvoreno 22. travnja 2009. godine na Dan planete Zemlje. Prije navedenog datuma, pogon je bio šest mjeseci u probnom radu. Cjelokupno upravljanje postrojenjem je automatizirano i vrši se iz upravljačkog centra. Nazivna snaga je 350 kW sa kapacitetom od 4.000 kg/sat. Kapaciteti oba pogona u jednoj smjeni su 18.000 tona godišnje [1].



**Slika 1.** Postrojenje za recikliranje EE otpada [1]

## 2.1. EE otpad

Električni i elektronički uređaji i oprema (EE-oprema) predstavljaju sve proizvode koji su za svoje pravilno djelovanje ovisni o električnoj energiji ili elektromagnetskim poljima, kao i oprema za proizvodnju, prijenos i mjerenje struje, te je namijenjena korištenju pri naponu koji ne prelazi 1000 V za izmjeničnu i 1500 V za istosmjernu struju.

Kada vlasnik električnog ili elektroničkog uređaja odluči taj uređaj odbaciti, bilo zbog kvara ili zamjene za novi, bolji uređaj, tada taj uređaj postaje električni, odnosno elektronički otpad (EE-otpad).

Prema mjestu nastanka EE-otpad se dijeli u dvije grupe:

1. EE-otpad iz kućanstva,
2. EE-otpad koji nastaje u gospodarstvu (industrija, obrt i slično).

Sav otpad se prema svojstvima dijeli na:

- neopasni,
- opasni,
- inertni.

Cjelokupni EE-otpad spada u skupinu opasnog otpada zbog opasnih komponenti koje sadrži, kao što su živa, kadmij, krom, brom, olovo, arsen, azbest, spojevi silicija, berilija, fosfor itd. Zbog opasnih komponenti koje EE-otpad u sebi sadrži, on ne smije nikako završiti niti u glomaznom, niti u komunalnom otpadu, te se mora sakupljati odvojeno od ostalih vrsta otpada kako bi se opasni dijelovi izdvojili i zbrinuli na odgovarajući način, a neopasni dijelovi (metal, polimerni materijali i sl.) ponovno iskoristili.

## 2.2. Oporaba ( reciklaža ) EE- otpada

Otpadni električni i elektronički uređaji i oprema sadrže polimerne materijale, metale i slične materijale koji se mogu nakon uporabe (recikliranja) ponovno koristiti kao polazna sirovina za neki novi proizvod. Oporaba je svaki postupak ponovne obrade otpada koji omogućava izdvajanje sekundarnih sirovina ili uporabu otpada u energetske svrhe. Oni dijelovi otpada koji se ne mogu ponovno koristiti moraju se zbrinuti na ekološki prihvatljiv način [2].

Tehnološki proces oporabe EE-otpada dijelimo na 3 faze:

- odvojeno skupljanje,
- primarna obrada,
- sekundarna obrada.

S obzirom da je EE-otpad klasificiran kao opasni otpad, on se iz kućanstava i gospodarstva mora sakupljati i odvoziti odvojeno od ostalog otpada.

Primarnom obradom obavlja se rastavljanje otpadnih uređaja i opreme i izdvajanje opasnih tvari kao što su:

- polimernih materijala koji sadrži bromirane usporivače gorenja (BFR, od engl. *Brominated flame retardants*),
- živinih prekidača,
- tonera,
- katodnih cijevi,
- baterija i akumulatora.

Također, izdvajaju se vrijedne komponente kao što su:

- transformatori,
- vanjski električni kablovi,
- tiskane ploče,
- elektromotori,
- tvrdi diskovi,
- jedinice CD/DVD-ROM.

Primarno obrađeni EE-otpad stavlja se na transportnu traku koja prenosi materijal do prvog usitnjivača (tzv. šreder, od engleske riječi *shredding*, što znači usitnjavanje) veličine noževa 78 mm. Tako usitnjeni materijal se magnetnim separatorom razdvaja na željezne i ostale materijale. Željezni materijali se odvajaju u posebne kontejnere, prešaju u hidrauličnoj preši i tako prešani u bale (tzv. „nešrederirano željezo“) se prodaju na tržištu kao sekundarna sirovina. Iz ostalih materijala, među kojima još uvijek ima i željeznih, se na transportnoj traci ručno odvajaju eventualno preostale opasne komponente od vrijednih komponenti. Materijal po traci dolazi do četveroosovinskog usitnjivača koji ga usitnjava na veličinu 28 mm. Magnetnim separatorima se izdvajaju preostali željezni materijali, koje se ovako obrađeni (tzv. „šrederirano željezo“) plasiraju na tržište sekundarnih trgovina. Preostali materijal prenosi se sljedećom transportnom trakom na odjeljivač vrtložnim strujama (engl. *eddy*

current), gdje se pomoću brzo mijenjajućeg magnetnog polja odvajaju neželjezni metali (aluminij, bakar i mjed) od polimernih materijala. Polimerni materijali se zbog sadržaja opasnih bromiranih usporivača gorenja (BFR) pakiraju i transportiraju iz Hrvatske u inozemstvo gdje se spaljuju na 1200 °C kako se ne bi oslobađao otrovni plin dioksin. Neželjezni metali transportnim elevatorima idu u mlin čekićar koji ih oblikuje u kuglice približno iste veličine. Te kuglice padaju na sito koje ih odvaja po veličini od 3 mm i veće. Tako separirane kuglice (slika2 ) padaju na zračni separator koji odvaja lakšu frakciju (aluminij i aluminijske legure) i težu frakciju (bakar i mjed) [2].



**Slika 2.** Separirane kuglice [2]



### 3. USITNJAVANJE ČVRSTIH MATERIJALA

Usitnjavanje je operacija kod koje se drobi i/ili melje materijal, pri čemu iz većih nastaju sitnije čestice. Na taj se način postiže i povećanje površine materijala, što ubrzava kemijske i toplinske procese u kojima taj materijala sudjeluje. Postupci drobljenja i mljevenja međusobno se razlikuju prvenstveno veličinom usitnjenih čestica, tj. drobi se krupniji materijal s usitnjenjem čestica do cca 10 mm, a melju se čestice veličine do cca 20 mm s usitnjenjem koje može iznositi i nekoliko mikrometara. Ti se postupci provode šaržno ili kontinuirano, pri čemu se čestice često i klasiraju. Kod zatvorenih se ciklusa materijal usitnjuje i prosijava, a krupnije se čestice prelaza sa sita pri tom ponovo usitnjavaju (recikliranje). Kod otvorenih ciklusa materijal se usitnjuje i eventualno klasira bez recikliranja. U zavisnosti o fizičko-mehaničkih osobina i dimenzija čestica prije i poslije loma, odabire se postupak usitnjavanja:

- a) tlačenjem čestica između čvrstih površina,
- b) udarima tijela koja se gibaju različitim brzinama,
- c) gibanjem čestica između površina koje miruju,
- d) gibanjem čestica između površina koje se kreću različitim brzinama,
- e) međusobnim sudaranjem čestica u turbulentnoj struji plina.

Većina uređaja za usitnjavanje koristi kombinaciju navedenih karakterističnih postupaka. Stupanj usitnjavanja obično se određuje iz prosječne veličine  $d_c$  čestica prije i veličine čestica  $x$  poslije usitnjavanja.

Za usitnjavanje različito formiranih materijala koriste se vanjske sile, uvjetovane tlakom, smicanjem, udarom ili trenjem. Utjecaj tih sila je takav, da se čvrsto tijelo deformira i zatim usitnjava (lomi, melje). Deformacija i lom usko su povezani s naprezanjem u čvrstom tijelu i s tzv. pukotinama. Pukotina je naziv za različite pojave (defekte) unutar čvrstog tijela i na njegovoj površini, npr. odstupanje u formiranju kristalnih rešetki, pojave napetosti u kristalnoj strukturi, mikropukotine, naprsline unutar materijala i njegovoj površini i sl. Te pukotine djeluju kao procjep (zarez) na čijem vrhu se koncentriraju naprezanja, a u neposrednoj blizini vrha pukotine javlja se energija mikroplastične deformacije. Za širenje pukotine mjerodavna je energija loma, koja sadrži energiju mikroplastične deformacije i energiju koja se javlja na graničnim plohama pukotine. Složeni odnosi tih energija uvjetuju širenju pukotine kad je

materijal opterećen vanjskim silama, pri čemu treba znati da je prekidna čvrstoća na mjestu pukotine znatno manja od prekidne čvrstoće idealiziranog materijala.

Inicijalno širenje pukotine uvjetuje pojavu primarnih naprslina, koja se naglo šire unutar materijala, što dovodi do loma i usitnjavanja čestica. Pri tome je utjecajna stvorena toplina i ostale fizičke i kemijske pojave do kojih dolazi kod tog nepovratnog procesa. Kako su pukotine različito raspoređene u materijalu i lomovi čestica su veoma različiti. Energija utrošena na usitnjavanje ovisi o količini materijala, veličini i svojstvima čestica, disperzijskim silama, elektrostatskim silama, hrapavosti površine i prisutnoj kapljevini. Prema Rittingerovoj zakonitosti, utrošena energija direktno je proporcionalna s povećanjem površine pri lomu. Energetska bilanca procesa loma pokazuje:

- da se oko 70 % dovedene energije pretvara u toplinu, pri čemu se dio te energije nepovratno gubi, a preostali dio energije utječe na napregnuto stanje materijala,
- oko 25 % dovedene energije se troši na pogonski uređaj,
- a svega oko 5 % energije se troši na usitnjavanje.

Energetski potencijal  $E_{\epsilon}$  čestica, koje se lome, ovisi o njihovoj masi  $m_{\epsilon}$  i brzini  $v_{\epsilon}$ , odnosno o primijenjenom tlaku  $p$ . Manja će čestica imati jednaki energetski potencijal  $E_{\epsilon}$  kao i veća čestica iste gustoće jedino onda, kada ima veću brzinu, ili kada se primjeni veći tlak, na što ukazuje relacija (1):

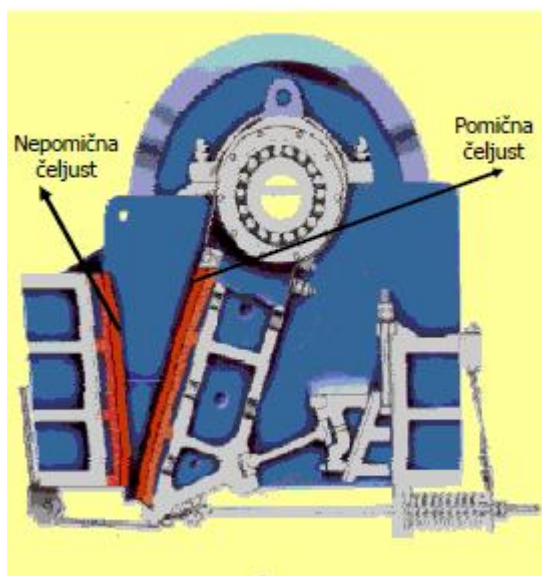
$$E_{\epsilon} = m_{\epsilon} \frac{v_{\epsilon}^2}{2} = V_{\epsilon} \rho_{\epsilon} \frac{v_{\epsilon}^2}{2} = V_{\epsilon} p \quad (1)$$

Vjerojatnost loma čestice ovisi o njihovoj veličini i energetskom potencijalu. Npr. staklena kuglica promjera 8 mm usitnit će se na manje čestice kod udarne brzine 2 m/s s 90 % vjerojatnosti, a staklena kuglica promjera 0,1 mm usitnit će se na manje čestice uz istu vjerojatnost s udarnom brzinom većom od 200 m/s. Iz navedenog primjera može se zaključiti da se veće čestice lome lakše od manjih čestica, tj. što je usitnjenje čestica finije, to je potreban veći tlak ili veća brzina udara [3].

### 3.1. Drobilice

U čeljusnim drobilicama materijal se usitnjava istovremeno tlakom i smicanjem između pokretne i nepokretne čeljusti (slika 3). Dva osnovna tipa tih drobilica se razlikuju položajem sklopa koji pokreće pokretnu čeljust, tj. os njihovanja može biti na gornjoj i donjoj

strani drobilice. Kapacitet im je i iznad 2000 t/h, uz utrošak energije od 1 do 1,5 kWh/t, što ovisi o vrsti materijala i stupnju usitnjavanja. Jednostavne su konstrukcije, čeljusti se lako zamjenjuju, a posluživanje ne zahtjeva kvalificirane radnike.



Slika 3. Čeljusna drobilica [3]

Konusne drobilice usitnjavaju materijal približavanjem površine unutrašnjeg pokretnog konusa i vanjskog nepokretnog konusa. U odnosu na čeljusne drobilice razlikuju se većim kapacitetom, uravnoteženijim radom i visokim stupnjem usitnjavanja [3].

### 3.2. Mlinovi

Bubnjasti mlinovi se sastoje od horizontalno položenog cilindričnog ili konusnog bubnja, pri čemu je bubanj ujedno i prostor za usitnjavanje. U bubnju se nalaze tijela za mljevenje, pa prema vrsti tih tijela razlikujemo mlinove s kuglama, mlinove sa šipkama, mlinove sa šljunkom itd, te mlinove u kojima se same čestice međusobno melju. Pri okretanju bubnja se tijela za mljevenje (kugle, šipke i sl.) pod utjecajem centrifugalne sile i sila trenja priljubljuju uz njegovu površinu, i s određene visine slobodno padaju, što uvjetuje mljevenje udarom, tlakom i trenjem. Brzina vrtnje bubnja pri kojoj tijela za mljevenje ostaju priljubljena uz njegovu površinu naziva se kritičnom, jer tada nema korisnog rada [3]. Ta se kritična brzina vrtnje određuje izrazom (2):

$$n_{kr} = \frac{0,65}{D^{0,5}} \quad (2)$$

gdje je:  $D$ -unutrašnji promjer bubnja.

Mljevenje se izvodi mokrim kao i suhim postupkom. Kapacitet mlina se utvrđuje iskustveno, jer ovisi o svojstvu materijala, masi i veličini tijela za mljevenje, promjeru i dužini bubnja itd.

Strujni mlinovi se koriste za fino mljevenje, iskorištavanjem kinetičke energije međusobnih sudara čestica koje sobom nosi uzdah, vodena para ili inertni plin. Materijal za mljevenje se dovodi injektorom, pri čemu se postižu i strujne brzine jednake ili veće od brzine zvuka kod izlaznog stanja. Čestice većih dimenzija se odbacuju prema vanjskim stijenama vertikalnih cijevi i odbijanjem se ponovo unose u zonu mljevenja, pri čemu mogu kružiti i do 2000 puta – sve dok ne budu dovoljno usitnjene i odnešene klasiranjem. Stupanj usitnjavanja dostiže i do 1:6000. Glavni im je nedostatak velika potrošnja energije, tj. velika potrošnja medija koji struji. Ta potrošnja iznosi cca 9 do 10 kg medija po 1 kg samljevenih čestica.

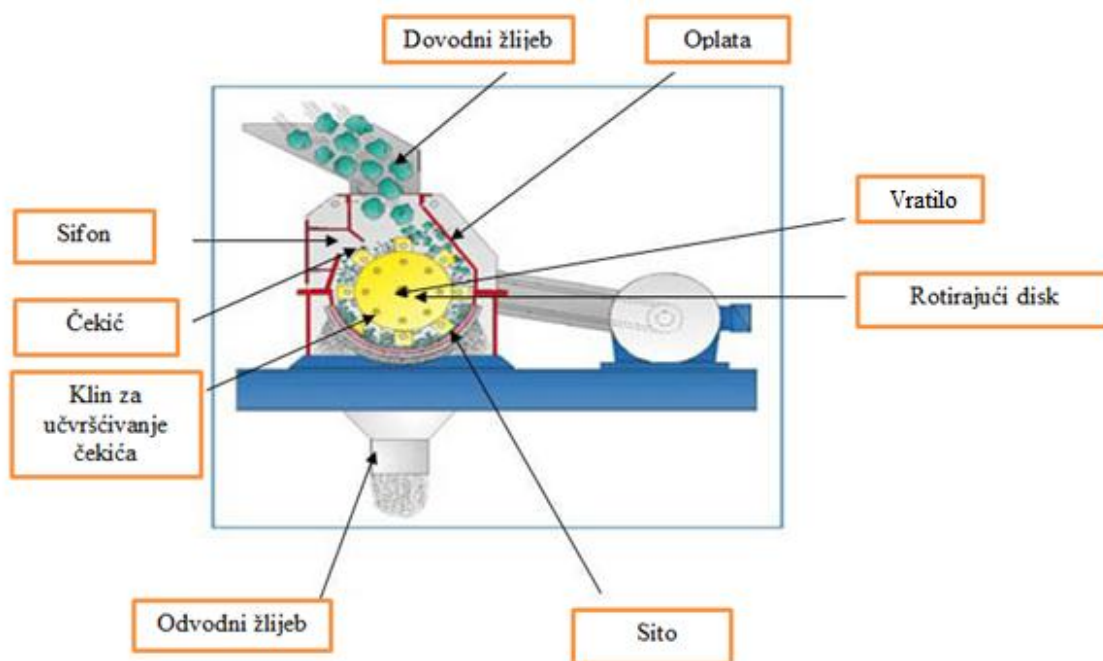
Koloidni mlinovi se koriste za veoma fino mokro mljevenje. Materijal se melje između rotora koji ima veliku brzinu vrtnje i nepokretnog statora. Pri rotaciji rotora centrifugalna sila stvara podtlak pa se čestice s tekućinom usisavaju kroz ulazni otvor i melju do prosječnih veličina  $10^{-4}$  mm.

Mlinovi s valjcima se izvode s jednim ili dva para valjaka najčešće iz lijevanog željeza. Površina valjaka je termički obrađena ili obložena materijalom otpornim na habanje, a ovisno o namjeni ona je glatka ili ožljebljena. Razmak između valjaka se može podesiti, a u radu su valjci samopodesivi. Na kućištu se kod najčešćih izvedbi, za potrebe mlinarstva, nalaze otvori za ventilaciju. Po dužnom metru valjka dovodi se cca 0,001 do 0,06 m<sup>3</sup>/s uzduha. Brzina vrtnje gornjih valjaka je cca 3 do 6 °/s, a broj okretaja donjih valjaka je 1,5 do 2,5 puta manji. Stupanj usitnjavanja kreće se u granicama od 1:3 do 1:20. Potrebna snaga za mljevenje ovisi prvenstveno o materijalu koji se melje, stupnju usitnjavanja i izvedbi valjaka.

Dezintegratori se sastoje od dvije ploče s horizontalnim klinovima koji su raspoređeni u koncentričnim krugovima. Ploče se vrte u suprotnom smjeru velikom brzinom, a jedna ploča može biti i nepokretna. Materijal ulazi aksijalno između ploča. Ako se koriste za drobljenje materijala obodna brzina iznosi 22 do 37 m/s, a kod dezintegratora koji se koriste za mljevenje ta brzina je znatno veća. Stupanj usitnjavanja im je visok i do 1:50.

Mlin čekićar, prikazan na slici 4, je stroj čija je svrha da raskomada ili razbije čvrsti materijal na manje komade. Sastoji se od jednog ili dva rotora koji se velikom brzinom (300 do 1500 min<sup>-1</sup>) okreću oko horizontalno postavljene osi u kućištu. Na rotoru su pričvršćena klatna (čekići) koja udarom lome i usitnjavaju materijal. Obodna brzina pojedinog klatna je

30 do 55 m/s. Pri dnu je ograđeno sito koje se može izmijeniti. Klatna (čekići), ploče i sito izrađuju se od čelika s tvrdo legiranim umecima, ili od manganskih čelika. Kapacitet im je visok, do 300 kg/s, uz instaliranu snagu i do 100 kW. Stupanj usitnjenja im je visok, od 1:20 do 1:40. Primjenjuju se za drobljenje vlaknastih i ovlaženih materijala, kao i materijala različite tvrdoće, pa imaju široko područje primjene [3].



**Slika 4. Mlin čekičar s osnovnim dijelovima [4]**

Rade na principu kod kojeg se većina materijala razbije ili rasprši nakon udara pomoću jednostavnih četiri koraka operacije:

1. materijal se ubacuje u komoru mlina, najčešće gravitacijski,
2. pomoću čekića na rotirajućem disku, koji je pričvršćen na vratilo koje se vrti velikom brzinom, materijal se lomi i usitnjava,
3. metalna žičana sita, ili rešetke koje pokrivaju odvodni žlijeb zadržavaju krupnije komade materijala za ponovno mljevenje, a propuštaju materijal željene veličine,
4. tvrdi materijali poput stakla ili kamena izlaze iz mlina gravitacijski, dok se lakši materijali poput drva i papira usisavaju.

Mijenjanjem veličine dovodnog žlijeba, brzine vrtnje vratila ili dimenzije čekića može se mijenjati veličina gotovog proizvoda [4].

## 4. OPLATA MLINA ČEKIČARA

Većina proizvođača oplata za mlin čekičar oplata izrađuju od austenitnih manganskih čelika koji sadrže oko 1,2% C i 12% Mn (C:Mn=1:10). Takvi čelici su otporni na trošenje i jedinstveni po tome što posjeduju kombinaciju visoke žilavosti i istezanja s visokim kapacitetom očvršćivanja te dobrom otpornosti na trošenje. Takav čelik prihvaćen je kao vrlo koristan inženjerski metalni materijal prvenstveno u području građevinarstva (mehanizacija), rudarstva, industrije nafte i plina, u proizvodnji cementa, za izradu dijelova drobilica, mlinova, bagera, pumpi za transport šljunka i kamena, vojnoj industriji itd.

Poboljšanje sastava manganskih čelika obično uključuje promjenu sadržaja ugljika i mangana, sa ili bez dodatnih legirajućih elemenata (kao što su npr. krom, nikal, molibden, vanadij, titan i bizmut).

Mehanička svojstva austenitnog manganskog čelika razlikuju se s obzirom na sadržaj ugljika i mangana. Zbog abrazijske otpornosti koja se povećava porastom sadržaja ugljika, poželjno je da sadržaj ugljika bude viši od 1,2% (kada se zahtjeva niža duktilnost). Čelik sa sadržajem ugljika iznad 1,4% se rijetko koristi zbog teškoća dobivanja austenitne mikrostrukture te nastanka karbida po granicama zrna, koji su štetni u pogledu čvrstoće i istezanja. Niski sadržaj ugljika (0,7% C najmanje) koristi se kako bi se smanjila precipitacija karbida u teškim odljevcima ili u zavaru. Titan može smanjiti sadržaj ugljika u austenitu stvaranjem vrlo stabilnih karbida. Također, titan može donekle neutralizirati učinak prekomjernog sadržaja fosfora. Prema nekim istraživačima mikrolegirajući dodaci (<0,1%) titana, vanadija, bora, cirkonija i dušika omogućavaju usitnjenje zrna u manganskim čelicima. Međutim, postoje neke nekonzistentnosti u svezi toga. Veća količina mikrolegirajućih elemenata može dovesti do značajnog gubitka duktilnosti. Dušik u količinama većim od 0,20% može uzrokovati plinsku poroznost u odljevcima. Sumpor u Mn-čeliku uglavnom ne utječe na njegova svojstva jer djelovanjem mangana sumpor prelazi u relativno neškodljiv oblik (MnS). Međutim, najbolje je održavati sadržaj sumpora kod nižih vrijednosti kako bi se smanjio broj uključaka u mikrostrukтури koji mogu biti inicijalna mjesta pojave pukotina.

Austenitni čelici s višim sadržajem mangana (> 15%) razvijeni su za primjenu koja zahtjeva nisku magnetsku permeabilnost, te čvrstoću i žilavost pri niskim temperaturama. Navedena primjena proizlazi iz razvoja supravodljivih tehnologija koje se koriste u

transportnim sustavima i istraživanju nuklearne fuzije te potrebi za razvojem konstrukcijskog materijala koji će služiti za spremanje i transport ukapljenih plinova.

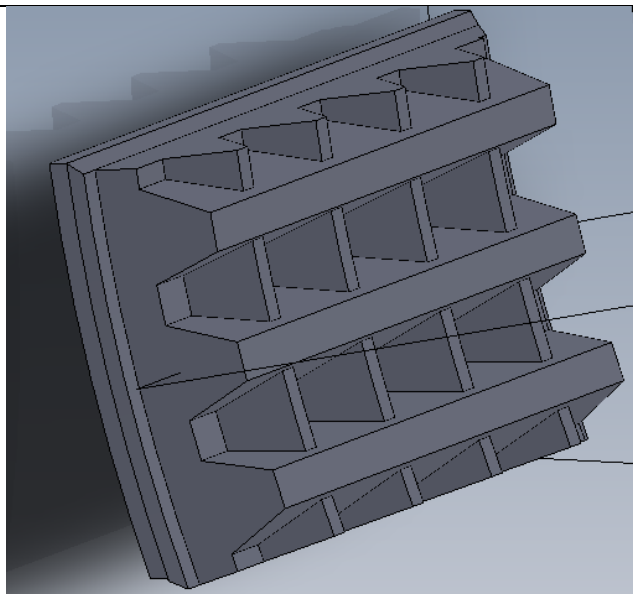
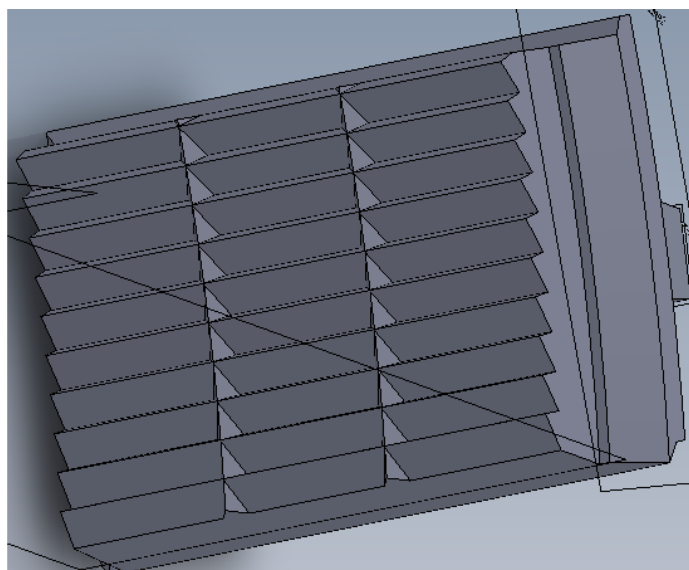
Zahtjev za niskom magnetskom permeabilnosti ostvaruje se legurama koje imaju niži sadržaj ugljika. Odgovarajući gubitak čvrstoće (zbog nižeg sadržaja ugljika) nadoknađuje se legiranjem s vanadijem, dušikom, kromom, molibdenom i titanom. Krom također daje otpornost na koroziju što je nužni zahtjev kod primjene u kriogenim uvjetima.

Toplinskom obradbom dolazi do porasta čvrstoće manganskog austenitnog čelika. Žarenje i gašenje u vodi, kao i austenitizacija predstavljaju standardnu toplinsku obradbu kojom se dobivaju proizvodi uobičajene vlačne čvrstoće i željene žilavosti. Varijacije navedene toplinske obradbe mogu se koristiti za poboljšanje točno specificiranih svojstava kao što su npr. granica razvlačenja i otpornost na trošenje.

Obično se u gašenom stanju želi postići potpuno austenitna mikrostruktura, bez karbida te homogena s obzirom na ugljik i mangan. Međutim, to nije uvijek ostvarivo u velikim i teškim otkovcima ili kod čelika koji sadrže elemente koji stvaraju karbide. Ako postoje karbidi u gašenoj mikrostrukturi poželjnije je da budu prisutni u obliku relativno neškodljivih čestica ili nodula unutar zrna austenita nego kao kontinuirani sloj na granicama zrna.

Visokolegirani čelici otporni na trošenje (npr. 1,2% C i 12,5% Mn) najčešće se primjenjuju kada je proizvod izložen visokom pritisku i udaru (npr. članci gusjenica, dijelovi drobilica i mlinova, zubi bagera, noževi buldožera, skretnice vlakova i tramvaja itd.). Niskolegirani čelik (npr. 0,5% C i 1,8% Mn) upotrebljava se kada je primjena visokolegiranih manganskih čelika nemoguća zbog ekonomskih razloga ili zbog teške obrade [5].

Tvrtka Spectra media d.o.o koristi dvije vrste oplata kod usitnjavanja EE – otpada. Na slici 5 i slici 6 prikazani su modeli tih oplata koji su izrađeni u programskom paketu SolidWorks. Oplate se mijenjaju ovisno o vrsti materijala koji se usitnjava. Oplata prikazana slikom 6 tzv. "žica" koristi se kod usitnjavanja žica, dok se za ostale materijala koristi oplata prikazana slikom 5 tzv. "ribež". Obje oplate napravljene su od čelika oznake X120Mn12 (ASTM A128 Grade B2) čiji je kemijski sastav prikazan u tablici 1.

**Slika 5. Oplata "ribež"****Slika 6. Oplata "žica"****Tablica 1. Kemijski sastav čelika oznake X120Mn12 [6]**

Kemijski element	Postotak
Ugljik, C	1,15 %
Mangan, Mn	13 %
Silicij, Si	0,40 %
Sumpor, S	< 0,0020 %



## 5. IZBOR MATERIJALA

Pravilan izbor materijala sve se više nameće kao nužan uvjet za postizanje kvalitetnijeg proizvoda, uz kontinuirano unapređenje proizvodnih postupaka izrade i konstrukcijskih rješenja. S tim u svezi, faza izbora materijala tijekom razvoja proizvoda predstavlja iznimno važan korak, koji bi i trebao nastupiti u što ranijoj fazi projektiranja proizvoda. Proces razvoja proizvoda, od idejnog koncepta do konačnog detaljnog konstrukcijskog rješenja određuju četiri osnovne skupine faktora, a to su:

1. TEHNIČKI – funkcijski i eksploatacijski zahtjevi, odgovarajuća svojstva i radne karakteristike proizvoda, tehnologija i raspoloživa oprema, energetska svojstva
2. EKONOMSKI – troškovi razvoja i proizvodnje, cijena proizvoda, investicijski troškovi, produktivnost i rentabilnost, mogućnosti kooperacije, diverzificiranost proizvoda itd.
3. DRUŠTVENI, HUMANI – potrebe čovjeka i društva u cjelini, uporabljivost proizvoda, recikliranje i utjecaj na okoliš, kulturološka i informacijska svojstva itd.
4. PRAVNI – norme, zakoni, propisi, zaštita izuma, patenta i modela, postupci proizvodnje (*know – how, know –why*) itd. [7]

### 5.1. Faze razvoja proizvoda

Kada materijale treba izabrati tijekom postupka konstruiranja, treba imati na umu da se sam postupak konstruiranja provodi kroz tri karakteristične faze, čiji redoslijed je iterativan:

1. koncipiranje;
2. projektiranje – razrada varijanti mogućeg rješenja;
3. konstruiranje dijelova i tehnološka razrada.

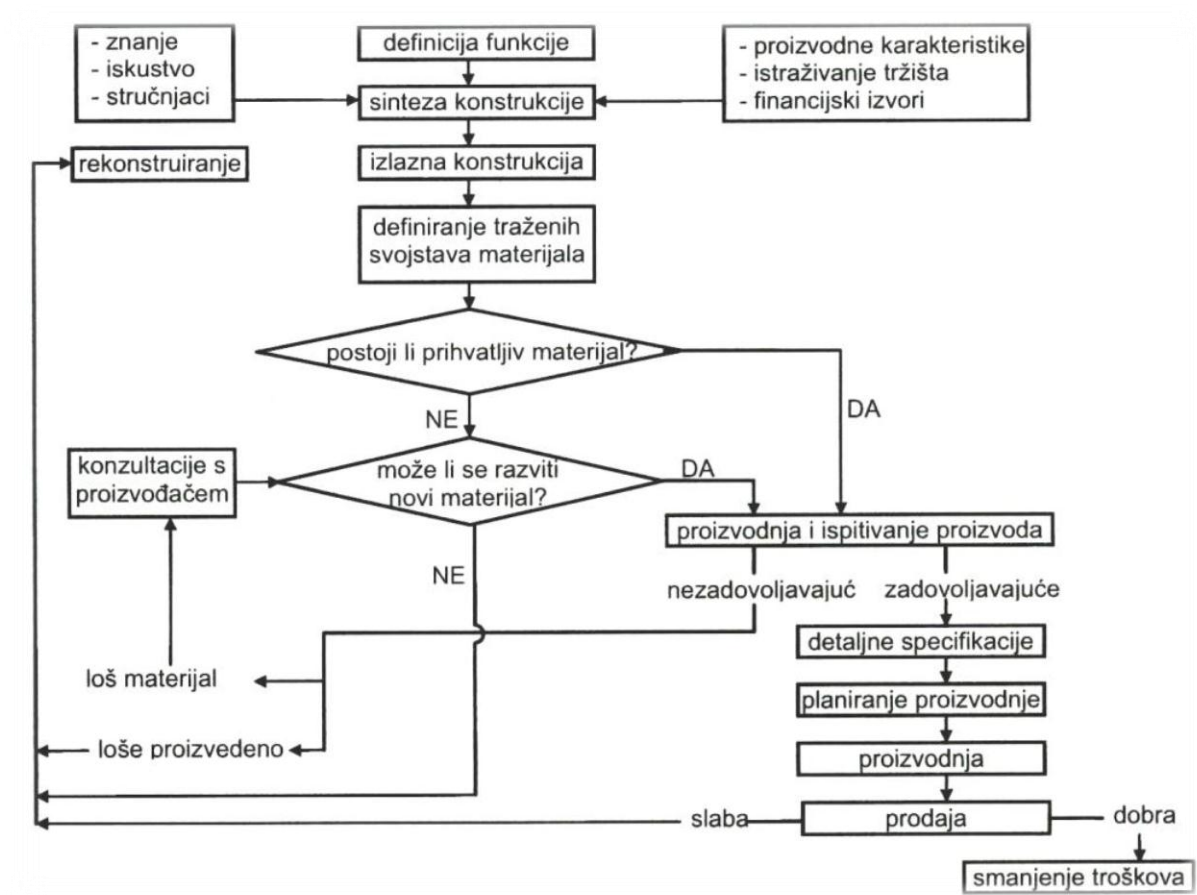
Izbor materijala se može obavljati u svakoj od faza, ali unutar različite veličine skupa raspoloživih materijala i s različitim stupnjem preciznosti rezultata.

1. KONCIPIRANJE – razvoj svakog novog proizvoda počinje od poznatih zahtjeva. U pogledu izbora materijala, sve varijante bi trebale biti podjednako prikladne u ovoj fazi. Određuju se osnovna funkcionalna svojstva materijala (npr. vodljivost električne struje, prozirnost, masa). Nadalje se definiraju polazni zahtjevi vezani uz radnu temperaturu,

agresivnost radnog medija, vrstu vanjskog opterećenja, oblik, dimenzije, izgled itd. U početnoj fazi razvoja prevladavaju poznate, predvidljive skupine materijala pa je vrlo važno postaviti kriterije usporedbe po širokoj lepezi mogućnosti. Tu nastaju poteškoće, npr. kada po jednakim kriterijima treba usporediti legure na bazi željeza, lake legure i polimerne materijale.

2. PROJEKTIRANJE – u ovoj fazi potrebno je poznavati što više informacija o materijalima koje poznajemo iz normi, kataloga i baza podataka. Slijedi detaljno razmatranje određenih skupina materijala te izdvajanje prikladnih skupina i vrsta materijala u obliku varijanti. Ova faza trebala bi rezultirati praktičnim specifikacijama dijelova i sklopova, utvrđivanjem skupa materijala i načelnim tijekom proizvodnog procesa. Ovdje se npr. mogu racionalizirati količine ugrađenog materijala, broj dijelova za ugradnju, mogu se razviti bolji proizvodi s gledišta energetske učinkovitosti, recikličnosti te s gledišta pouzdanosti.

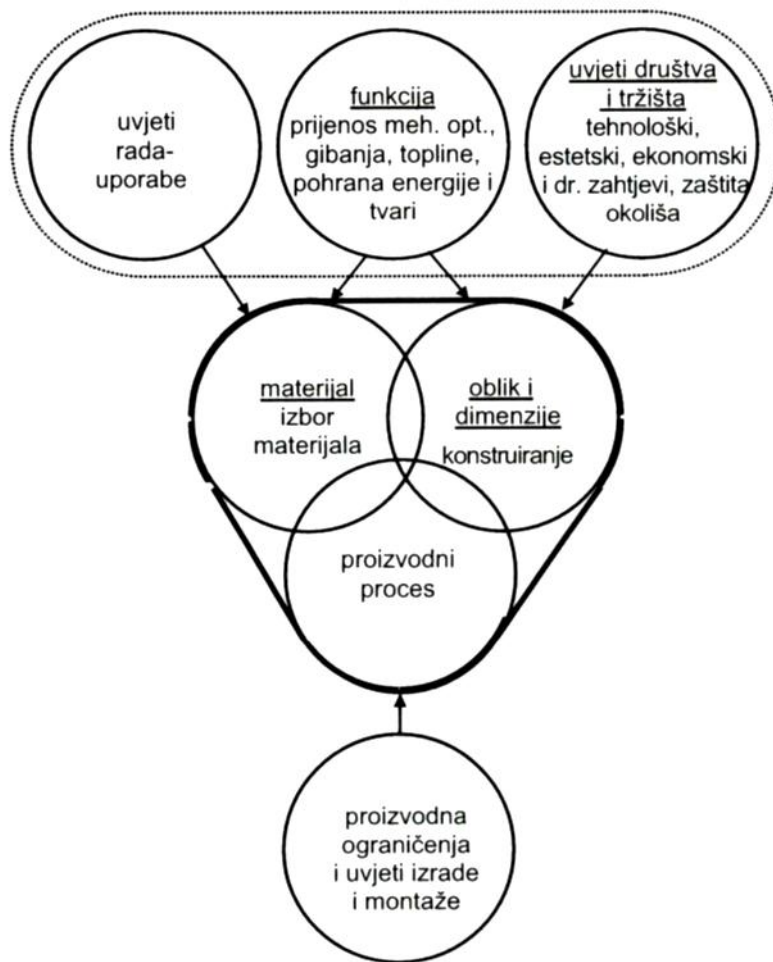
3. KONSTRUIRANJE DIJELOVA I TEHNOLOŠKA RAZRADA – za većinu proizvoda ovo je faza kada se odabire proizvođač ili dobavljač materijala, uz poznate parametre oblika, dimenzija, količine, ukupnog troška materijala i proizvodnje te mogućnost isporuke. Završni konstrukcijski proračuni, razrada tehnološkog procesa, kao i završna troškovna bilanca moraju se temeljiti na što jasnijim i preciznijim vrijednostima svojstava materijala budući da se te vrijednosti razlikuju od dobavljača do dobavljača. Budući da su faze tijekom postupka konstruiranja iterativne, slijedi da su međusobno povezani i da uzajamno utječu parametri funkcije i izgleda proizvoda te proizvodnje i troškova izrade proizvoda na položaj izbora materijala u procesu razvoja i realizacije proizvoda. Konačni cilj procesa razvoja i realizacije proizvoda je stvaranje proizvoda koji će usuglasiti interese i zahtjeve kupca (korisnika, naručitelja), trgovaca, proizvođača i autora konstrukcijsko-tehnološkog rješenja. Izbor materijala obavlja se u prvom redu tijekom faze projektiranja i konstruiranja proizvoda. Moguće je materijale birati i tijekom izrade ili nabave, ali to je više rezultat kasnijih promjena u konstrukcijsko-tehnološkoj dokumentaciji koje je teško predvidjeti u početku procesa stvaranja proizvoda ili zbog pogrešnih odluka donesenih tijekom konstruiranja. Upravo konstrukcijski odjel utječe na više od 2/3 troškova proizvoda, što jasno ukazuje na odgovornost pri aktivnostima kreiranja ideja i izrade tehničke dokumentacije proizvoda. Dijagram na slici 7 prikazuje slijed aktivnosti tijekom razvoja proizvoda, ukazuje na iterativni karakter određenih aktivnosti tijekom procesa razvoja, te položaj i važnost funkcije izbora materijala u ovisnosti prema ostalim funkcijama i aktivnostima [7].



Slika 7. Dijagram toka postupka razvoja proizvoda i izbora materijala [7]

## 5.2. Metodologija izbora materijala

Odluka o izboru optimalnog materijala metodološki je posložena još 70 - tih godina prošlog stoljeća. Tri aktivnosti (slika 8), ravnopravne po važnosti, trebale bi biti provedene u procesu razvoja proizvoda; konstrukcijsko oblikovanje, izbor materijala i izbor postupka proizvodnje.



**Slika 8. Prikaz veze konstrukcijskog oblikovanja, izbora materijala i izbora postupka proizvodnje [7]**

Ono što materijal nikako ne smije biti pri analizi izbora jest - unaprijed definiran. Materijal je integralna varijabla istovremenog razmatranja različitih mogućnosti ispunjenja zadanih zahtjeva, i sve se više upravo od njega očekuju odlučujući utjecaji na svojstva i mogućnosti završnog proizvoda. U praksi se, stoga, konstruktori sve više okreću metodičkom postupku izbora materijala, a manje iskustvenom. U najširem smislu, opći metodološki proces izbora materijala trebao bi sadržavati osam faza prema sljedećem redoslijedu [7]:

1. analiza konstrukcijskog zadatka;
2. odvajanje zahtjeva i kriterija vrednovanja materijala iz skupa zahtjeva i vrednovanja proizvoda;
3. izbor i rangiranje kriterija s preslikom na svojstva potrebna za usporedbu materijala ili za vrednovanje proizvoda s gledišta materijala;
4. eliminacija neprikladnih materijala (po tipu ili vrsti);

5. razrada varijanti rješenja s gledišta odnosa materijal - konstrukcijsko tehnološki parametri;
6. analiza i ocjena pojedinih varijanti;
7. izbor optimalne varijante i materijala;
8. oblikovanje izlaznih informacija o odabranim materijalima.

### 5.3. Osnovne skupine kriterija za izbor materijala

Osnovne skupine kriterija za izbor materijala pri razvoju proizvoda su:

- funkcionalnost,
- eksploataбилnost,
- tehnoložičnost,
- ekoložičnost – recikličnost i uništivost,
- ekonomičnost – raspoloživost, nabavljivost i cijena,
- normiranost – standardnost,
- estetičnost.

Funkcionalnost čini skup kriterija koji jasno određuju ostvarenje željene funkcije proizvoda u eksploataciji, odnosno njegov zadatak. Budući da se funkcija proizvoda realizira u eksploataciji, nemoguće je nezvezano analizirati kriterije funkcionalnosti i uporabivosti – eksploataбилnosti tijekom vremena. Na funkcioniranje proizvoda u eksploataciji djeluju sljedeća osnovna neželjena ponašanja:

- promjena dimenzija i oblika – prekomjerne elastične i plastične deformacije;
- narušavanje integriteta cjeline – lom;
- narušavanje integriteta površine – promjena stanja površine zbog trošenja, korozije i sl.

Bolja ili slabija funkcionalnost i eksploataбилnost ogledaju se u kvantifikaciji karakterističnih kriterija, kao što su:

- nosivost,
- sigurnost i pouzdanost,
- trajnost i
- prikladnost za održavanje i zamjenu.

Konačna kvantifikacija navedenih kriterija i usporedba materijala provodi se cijelim nizom svojstava materijala:

- fizikalno-kemijskim svojstvima materijala,
- mehaničkim svojstvima,
- otpornosti na trošenje,
- otpornosti na koroziju,
- postojanosti na djelovanje zračenja.

Tehnoloičnost je složeni kriterij koji sadrži elemente prikladnosti materijala za preoblikovanje, karakteristike pojedinog proizvodnog postupka ili postupaka, značajke opreme, ljudi te troškova izrade ili montaže. Budući da postupci proizvodnje bitno mijenjaju polazna svojstva materijala, zahtjev tehnoloičnosti treba ponajprije shvatiti kao potrebu da se postigne kvaliteta, ni veća, ni manja, nego upravo propisana proizvodnjom iz najjednostavnijih i najjeftinijih materijala primjenom najjednostavnijih i najjeftinijih proizvodnih postupaka. Govoreći o materijalu i njegovu ponašanju u proizvodnji, govorimo o sljedećim proizvodnim zahtjevima, a ujedno i o proizvodnim svojstvima materijala:

- livljivost,
- rezljivost,
- deformabilnost,
- zavarljivost i lemljivost,
- prikladnost za lijepljenje,
- prikladnost za prevlačenje površine,
- toplinska obradljivost.

Dodatni bitan kriterij je i trošak proizvodnje, čiji iznos ovisi o vrsti primijenjenog materijala.

Recikličnost i uništivost kao kriterij pri izboru materijala obuhvaćaju niz zahtjeva koji se odnose na bolje iskorištenje otpadnog materijala, čitavog proizvoda ili nekog njegovog dijela, kao i zaštite okoliša. Ovi zahtjevi i kriteriji obuhvaćaju npr. neka od sljedećih gledišta:

- mogućnost prirodne razgradnje,
- tehnološku složenost recikliranja i uništenja,
- štetnost za okoliš,
- mogućnost povrata materijala u proizvodni proces,
- troškove recikliranja i uništenja.

Ekonomičnost – raspoloživost, nabavljivost i cijena govore o tržišnosti materijala. U sebi sadrže karakteristike kao što su:

- porijeklo materijala – uvozni, domaći;
- raspoložive vrste, stanje i dimenzije poluproizvoda na tržištu ili kod pojedinih proizvođača;
- kvaliteta materijala pojedinih proizvođača ili dobavljača;
- uvjeti nabave – rokovi, pouzdanost isporuke, potrebni atesti i tehnički uvjeti isporuke;
- cijena materijala i troškovi nabave.

Normiranost – standardnost ukazuje na potrebu biranja materijala normiranih svojstava, tj. onih koji se uobičajeno proizvode i lakše su nabavljivi. Osim toga, često se upravo polazi od nužnosti ispunjenja nekih zakona, propisa, normi i preporuka u pogledu obavezne primjene unaprijed određenih vrsta materijala ili zadovoljenja specifičnih svojstava. Ovdje su primarno sadržana tehnička ograničenja i uvjeti primjene, uvjeti sigurnosti i zdravlja ljudi ili zaštite okoliša.

Estetičnost je posebno važna za konkurentnost proizvoda široke primjene, a manifestira se dimenzijskim skladom, bojom, sjajnošću, teksturom i sl. Ovaj se kriterij u pravilu na može mjerljivo izraziti, jer percepcija lijepog izgleda ponajprije ovisi o kulturološkim i tradicijskim stavovima kupaca. Ipak, svojom izvornom bojom ili mogućnošću promjene boje i stanja površine, te općenito mogućnošću oblikovanja, materijal utječe na konačan izgled proizvoda.

Budući da u konkretnoj situaciji ne mogu biti potpuno ispunjeni svi zahtjevi, gotovo uvijek se traži kompromisno ispunjenje nekoliko njih. Stoga se pri izboru materijala traži najpovoljnije rješenje u postojećim uvjetima, odnosno za neku realnu kombinaciju izvedenih svojstava materijala. Prema tome, izbor materijala se svodi na više ili manje složen problem traženja optimuma [7].

## 6. METODE IZBORA MATERIJALA

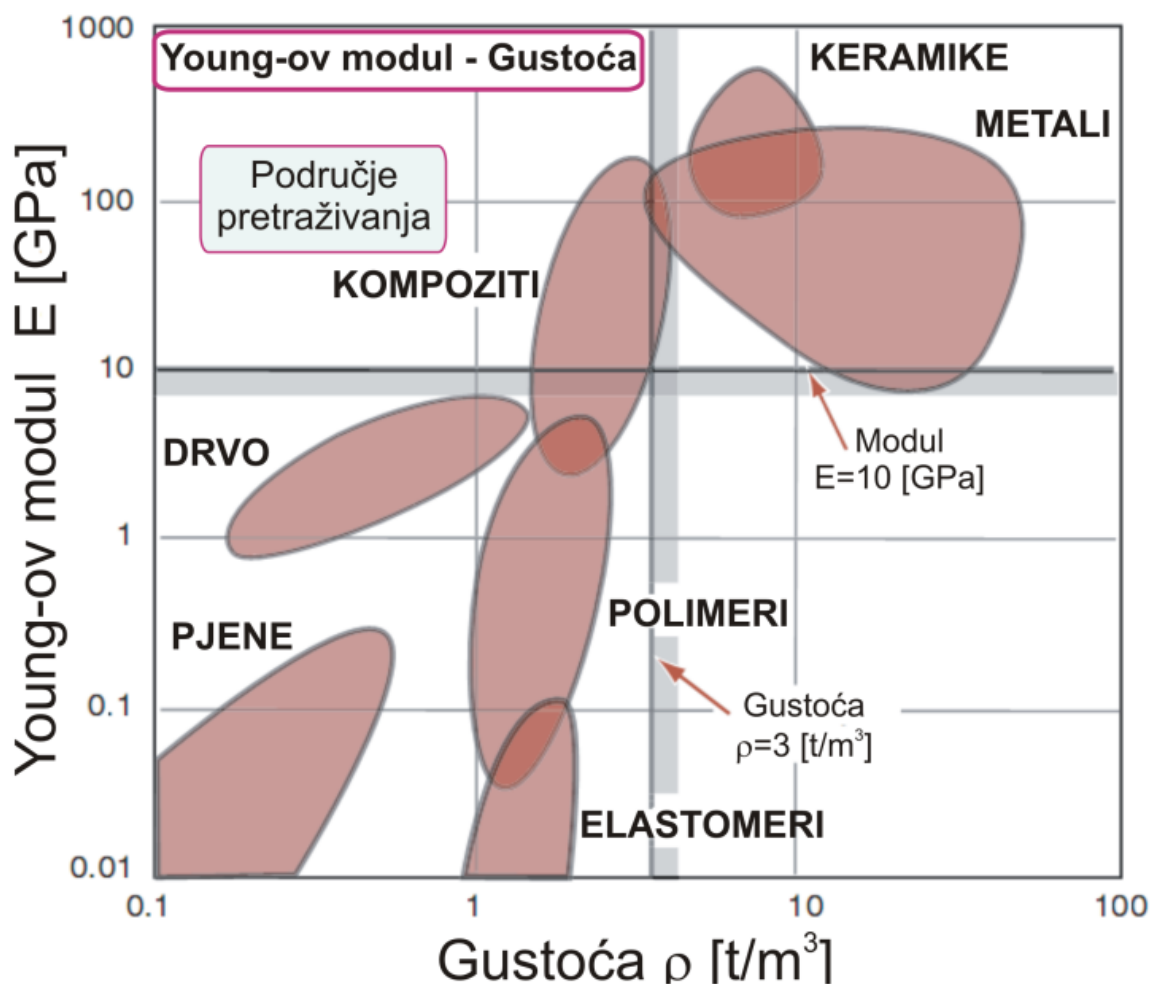
Pred današnje inženjere i konstruktore stavlja se težak zadatak: na koji način, od ogromnog broja raspoloživih materijala, izabrati upravo onaj najbolji za svoj proizvod. Do sada je izbor počivao na iskustvu inženjera i njegovom poznavanju različitih materijala. U svakoj tvrtki postojali su ljudi koji su bili specijalizirani za materijale. I uistinu, vrijednost iskustva inženjera specijalista za materijale je nedvojbeno. No, u svijetu su nastupile velike promjene koje ne idu u prilog ovom pristupu. S jedne strane broj različitih materijala se značajno povećao, a s druge strane pokretljivost radne snage je postala uobičajena pojava. Specijalisti za materijale, jednostavno, mogu prijeći u neku drugu tvrtku. Dakle, oslanjanje samo na strategiju učenja kroz iskustvo nije u skladu s današnjim tempom života. Sve više se javlja potreba za sustavnim metodologijama izbora materijala koje se mogu brzo realizirati i koje omogućavaju implementaciju računala. Kompatibilnost s postojećim alatima inženjerskog oblikovanja i proizvodnim postupcima je nužna, a to znači konstantno držati korak s tehničkim inovacijama i novim tehnološkim rješenjima. Upravo ova značajka aktualnosti i interaktivnosti važno je obilježje metode izbora materijala profesora Michaela Ashbyja. Ona se zasniva na tezi da dobar projektant mora razmotriti sve mogućnosti, bez diskriminacije bilo kojeg materijala ili postupka obrade. A to nije moguće bez držanja koraka s razvojem novih materijala. Ashbyjeva metoda daje putokaz kroz „šumu“ kompleksnog izbora s kojim se projektanti i inženjeri susreću. Uvodi se ideja atributa – indeksa materijala i procesa. Indeksi se prikazuju pomoću dijagrama koji pojednostavljaju početni izbor materijala i procesa. Nadalje, u realnim situacijama čest je slučaj suprotstavljenih zahtjeva. Npr. ako želimo projektirati laku i jeftinu konstrukciju dolazimo do suprotstavljenih ciljeva. Laki materijali su najčešće skuplji od težih. Rješenje zahtijeva upotrebu strategije kompromisa (engl. *trade off strategies*) koja uključuje suprotstavljene attribute. Pored tehničkih i ekonomskih utjecajnih elemenata, na konačnu odluku o izboru materijala sve više utječu i oblik, boja, osjećaj pri dodiru (taktilnost) i ekološkičnost. Ova metoda obuhvaća sve ove aspekte unutar discipline koja se naziva industrijsko oblikovanje ili industrijski dizajn. Takav pristup predstavlja vrlo važan iskorak. Ako se industrijski dizajn zanemari, prodaja opada i gubi se tržište.



Metoda se temelji na uspostavi nekoliko najvažnijih kriterija izbora materijala, a proces započinje definiranjem osnovne potrebe koju materijal treba zadovoljiti.

- Funkcija: koja je uloga proizvoda?
- Ograničenje: značajni zahtjevi koji moraju biti ispunjeni: npr. krutost, čvrstoća, otpornost na koroziju, sposobnost oblikovanja.
- Cilj: što treba maksimalizirati ili minimalizirati?
- Slobodne varijable: varijable problema koje nisu obuhvaćene ograničenjima.

Dijagrami svojstava materijala (slika 9) daju dobar pregled i vrlo su praktični kada postoji vrlo mali broj ograničenja. No, bez obzira na brojnost različitih svojstava materijala koji se mogu usporediti na ovaj način, broj materijala koji se mogu prikazati očito je vrlo ograničen, pa tako i upotreba ovih dijagrama. Kada je broj ograničenja velik, što najčešće jest slučaj, provjeravanje zadovoljavaju li materijali sva postavljena ograničenja je vrlo nepregledno.



Slika 9. Primjer dijagrama kod Ashbyjeve metode [8]

Oba problema su prevladana implementacijom računala u metodu izbora. Razvijeno je više programskih paketa za izbor materijala i izbor tehnoloških procesa obrade. CES EduPack je primjer takvog programa. Ovaj program sadrži veliku bazu podataka o materijalima, organiziranu hijerarhijski. Svaki zapis sadrži strukturirane podatke svojstava materijala, a svako svojstvo je pohranjeno kao raspon vrijednosti tog svojstva. Zapisi, također, sadrže i ograničen broj nestrukturiranih podataka u obliku teksta, slika i referenci na izvore informacija o materijalu. Podaci se pretražuju pomoću tražilica koje nude pretraživanje sučelja [8].

### **6.1. Kvantitativne metode izbora materijala**

U težnji k što objektivnijem i računalno podržanom odlučivanju razvijeno je desetak kvantitativnih metoda izbora materijala. Većina njih služi i za vrednovanje konstrukcijskih varijanti cijelog proizvoda, samo što se u modele uključuju drugi kriteriji i svojstva. Pretpostavka uporabe kvantitativnih metoda je raspolaganje brojčano iskazanim vrijednostima svojstva materijala u obliku mjerenih ili procijenjenih vrijednosti (ocjene). Dakako da i rezultati izbora najviše ovise o pouzdanosti i statističkom rasipanju tih podataka. Stoga kod nepouzdatih podataka treba konzultirati niz izbora, a često prikupljeni podaci podliježu statističkoj evaluaciji. Način na koji se izabire pogodan materijal najprije ovisi o broju i važnosti postavljenih zahtjeva i kriterija. U slušaju malog broja zahtjeva velike važnosti, težište je na kvalitativnoj i kvantitativnoj analizi svojstava i ponašanja manjeg broja materijala koji ulaze u uži izbor, informiranjem ili iskustvom. Primjena kvantitativnih metoda odlučivanja dolazi u obzir ponajprije kod velikog broja traženih svojstava, jer se može očekivati relativno velik broj prihvatljivih materijala [7].

Kod svih načina odlučivanja uspoređuju se tražene i postojeće vrijednosti svojstava materijala. Prema složenosti, ali i po redoslijedu odlučivanja razlikujemo tri načina usporedbe:

- 1) zadovoljavanje neke minimalne i maksimalne tražene vrijednosti, eliminacija preko nul – zahtjeva (kao što su npr. cijena, masa, vrijeme nabave, toplinska vodljivost...) – uglavnom se odnosi na invarijantne zahtjeve;
- 2) prekrivanje polja toleriranih vrijednosti – taj je način usporedbe prikladan za varijantne zahtjeve;

Rezultati provedbenih usporedbi mogu se predložiti s tri moguća izlaza:

- a) ni jedan materijal potpuno ne ispunjava zahtjeve (najnepovoljniji slučaj – ponovno se analiziraju zahtjevi ili se razvijaju novi materijali i proizvodni postupci);
  - b) jedan materijal potpuno ispunjava sve zahtjeve (mala vjerojatnost);
  - c) skup materijala koji potpuno ili djelomično ispunjava osnovne zahtjeve. Takav rezultat je u praksi najčešći, te se traži optimalno rješenje s pomoću:
- 3) minimiziranja ili maksimiranja vrijednosti unaprijed definirane funkcije cilja ili tzv. pokazatelja vrednovanja.

U općem obliku funkcija cilja ( $F_j$ ) je suma omjera postojećih ( $X_i$ ) i traženih vrijednosti ( $Y_i$ ) svih relevantnih svojstava, pri čemu se svaki omjer množi s faktorom važnosti ( $B_i$ ).

$$F_j \sum_{i=1}^n B_i \cdot \frac{X_i}{Y_i} \rightarrow \text{maks.} \quad (3)$$

Da bi se poništio utjecaj različitih apsolutnih vrijednosti svojstava, valja ih normalizirati, tj. svesti na isti red veličina (najčešće u rasponu 1...10 ili 1...100). Normalizacija ili skaliranje pojedine vrijednosti provodi se u odnosu na minimalnu ili maksimalnu vrijednost uspoređivanih materijala ili prema zahtijevanim vrijednostima.

Faktor važnosti ( $B_i$ ) određuje relativnu važnost pojedinog zahtjeva u odnosu na ostale i vrijednost je između 0 i 1. Zbroj faktora važnosti za sva svojstva obično mora biti jednak 1. Faktori važnosti određuju se na osnovi subjektivne procjene važnosti pojedinih svojstava ili s pomoću relativno objektivne digitalno – logičke metode, koja je kao takva opće prihvaćena. Kod tog postupka uspoređuje se svako svojstvo sa svakim te se važnijem pridružuje jedan, a manje važnom nula. Za "n" zahtjeva, ukupan broj pitanja bit će  $n(n-1)/2$ . Faktor važnosti bit

će jednak omjeru pozitivnih odluka za promatrano svojstvo i ukupnog broja pitanja. Ovakvo uspoređivanje je blisko ljudskom pristupu je se složeni problem rastavlja na niz pojedinačnih. Zanimljivo je da digitalno – logička metoda daje bolje rezultate, što je broj zahtjeva veći. Kod subjektivnih procjena to je upravo obrnuto.

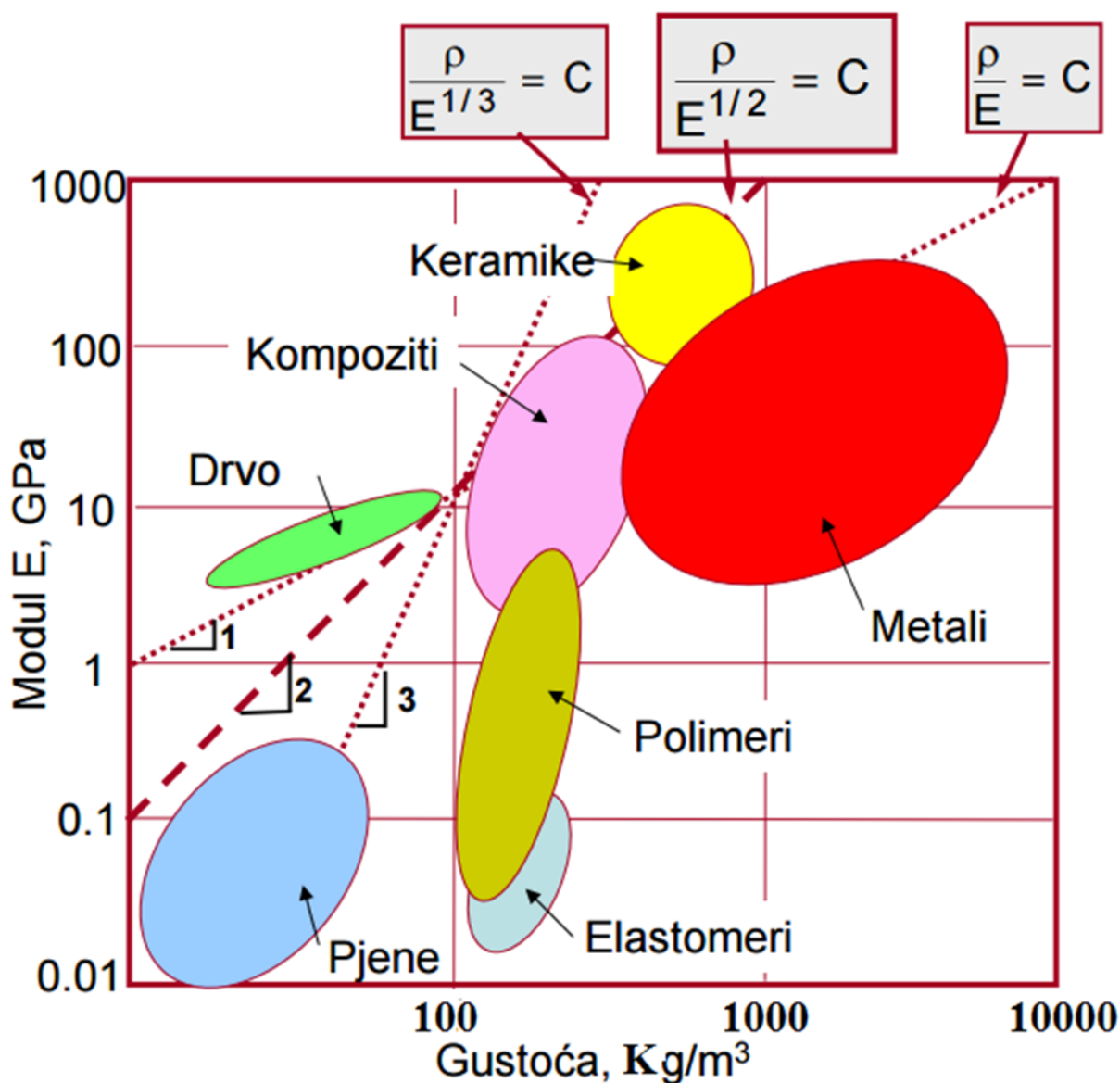
Drugi oblik funkcija cilja su tzv. pokazatelji vrednovanja u kojima se nalaze neke logične kombinacije unaprijed definiranih svojstava materijala, a vrijede za neki kriterij vrednovanja: masa, čvrstoća, krutost, otpornost na širenje pukotine, toplinske dilatacije, otpornost na toplinski šok, cijena jedinice svojstava i sl., i tp za poznate oblike dijelova i načine opterećenja. Ovi izrazi proizlaze iz različitih proračuna zasnovanih na fizikalnim zakonitostima ponašanja dijelova konstrukcija – teorije čvrstoće i mehanike loma, vibracija prijenosa topline i mase i dr.

U daljnjem tekstu detaljno se opisuju neke metode. Ipak, treba naglasiti da ni jedna od predloženih metoda ne zamjenjuje procjenu i iskustvo, nego pomaže inženjerima da ne zanemare ni jednu od pruženih mogućnosti ili da brzopleto i subjektivno odlučuju [7].

#### **6.1.1. Karte svojstava materijala**

Pri usporedbi materijala često nije dovoljno uzeti jedno svojstvo kao kriterij vrednovanja, nego je dužno razmatrati neku kombinaciju svojstava. Tako npr. za dijelove koji moraju biti laki i kruti treba zajedno vrednovati gustoću i modul elastičnosti ili za visokočvrste konstrukcije sigurne od naglih širenja pukotina i loma, važna je istovremeno visoka granica razvlačenja, ali i visoka istezljivost i lomna žilavost. Na osnovi takvog pristupa razvijene su tzv. "karte svojstava" gdje se u jednom dijagramu prikazuju područja okvirnih vrijednosti za nekoliko svojstava različitih skupina materijala.

Podatke za jednu skupinu materijala ograničuje zatvorena linija, pokazujući postizivi raspon vrijednosti bez obzira na vrstu materijala. Apscisa i ordinata su u logaritmičkom mjerilu pa se mogu prikazati i najniže i ekstremno visoke vrijednosti svojstava. Na taj je način olakšana usporedba skupina materijala, tj. okvirni predizbor materijala. Karte svojstava pomažu i u otkrivanju, ali i u potvrđi, korelacije između pojedinih svojstava materijala. Iz određenog dijagrama moguće je očitavati i druge informacije; tako npr. u dijagramu  $\rho - E$  (slika 10) usporedbene linije  $\frac{\rho}{E^{1/2}} = C$  govore o longitudinalnoj brzini širenja zvuka u čvrstom tijelu. U istom dijagramu linije  $\frac{\rho}{E} = C$ ,  $\frac{\rho}{E^{1/3}} = C$  i  $\frac{\rho}{E^{1/2}} = C$  ograničuju područja materijala za lake krute konstrukcije [7].



Slika 10. Karta svojstva za gustoću ( $\rho$ ) i modul elastičnosti ( $E$ ) [7]

### 6.1.2. Pokazatelji vrednovanja

Svaki tehnički proizvod ili njegov dio obavlja jednu ili više funkcija: prenosi sile i momente, provodi toplinu, transportira krute tvari, tekućine i plinove itd. Cilj je konstruktora projektirati lake, sigurne, kvalitetne i jeftine proizvode uz definirane dimenzije i oblik te zadana ograničenja – radno opterećenje, radnu temperaturu, djelovanje agresivnog okolišnog

medija itd. Iz analize funkcija, ciljeva razvoja te ograničenja izvode se tražena svojstva materijala i njihove granične vrijednosti, te konačno pokazatelji vrednovanja koji služe za odabir i optimalizaciju materijala. Pokazatelji vrednovanja su kvantitativne veličine koje grupiranjem svojstava materijala omogućuju maksimiranje ili minimiziranje nekog od kriterija ocjenjivanja ponašanja dijela ili materijala u proizvodu. Prednost primjene ove metode je neovisnost odabira materijala od optimiranja funkcije i geometrije. Tako je poznato da npr. materijali s višim vrijednostima pokazatelja "specifična krutost" ( $E/\rho$ ) imaju prednost za lake, krute vlačno opterećene dijelove. Svaki od pokazatelja vrednovanja izvodi se iz neke kombinacije funkcije, kriterija i ograničenja [7].

### 6.1.3. Metoda najmanjih odstupanja od traženih

U ovoj metodi postoje dva pristupa – algebarski i geometrijski.

#### Algebarski pristup

Materijali se uspoređuju na temelju apsolutne vrijednosti sume odstupanja od traženih (zahtijevanih). Traži se minimalna vrijednost izraza (4):

$$F_j = \sum_{i=1}^n B_i \left| \frac{X_i}{Y_i} - 1 \right| \quad (4)$$

gdje je:  $F_i$  – funkcija cilja

$X_i$  – vrijednost svojstva materijala

$Y_i$  – vrijednost zahtijevanog svojstva

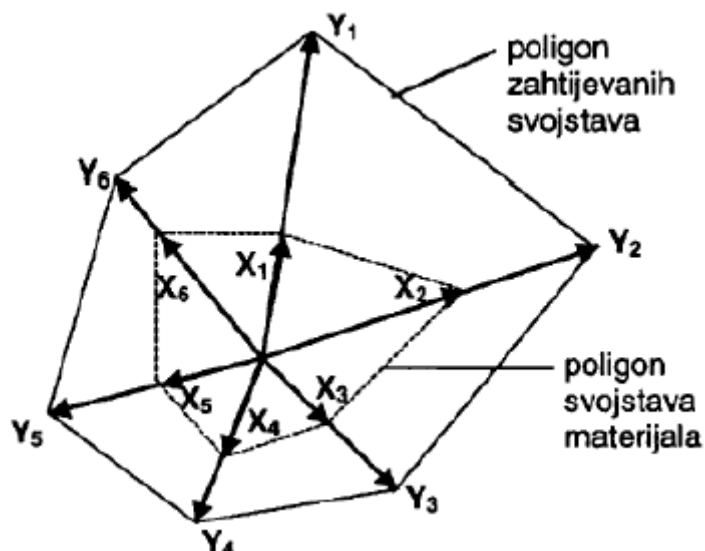
$n$  – broj svojstava

$j$  – broj materijala

$B_i$  – faktor važnosti za svaki zahtjev

#### Geometrijski pristup

Vrijednosti za zahtijevana svojstva su duljine označene s  $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$  (slika 11). Vrhovi ovih vektora zatvaraju tzv. poligon zahtijevanih svojstava. Materijal koji ulazi u postupak usporedbe, također oblikuje svoj poligon vrijednosti za svojstva  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ .



Slika 11. Poligoni zahtijevanih svojstava i postojećih svojstava materijala [7]

Prikladnost pojedinog materijala može se kvantitativno utvrditi prema sljedećim veličinama:

- sličnost površine poligona svojstava u odnosu na "idealni" – zahtijevani;
- sličnost oblika poligona kandidatnog i idealnog materijala;
- subjektivna procjena važnosti odstupanja svojstva od traženih svojstava.

#### a) Sličnost površine poligona ( $P_j$ )

Višedimenzionalni problem može se svesti na dvodimenzionalni izrazom (5):

$$P_j = \frac{\sum_{i=1}^m B_i \frac{X_i}{Y_i}}{\sum_{i=1}^n B_i} \quad (5)$$

Što je vrijednost  $P_j$  za pojedini materijal bliže jedinici, to je veličina njegova poligona svojstva bliže veličini poligona "idealnog" materijala. Ovo vrijedi za veći broj traženih svojstava kojima su pridružene više vrijednosti za  $B_i$ . Ukoliko je za veći broj svojstava vrijednost  $B_i$  blizu nuli, ova metoda ne daje pouzdane rezultate.

#### b) Sličnost oblika poligona svojstava ( $O_j$ )

Oblici se uspoređuju na temelju izraza (6) koji govori o minimalnom odstupanju svojstava od traženih:

$$O_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{X_i}{Y_i} - P_j \right)^2} \quad (6)$$

Što je  $O_j$  bliži 1, to je i oblik poligona X pojedinog materijala sličniji obliku traženog poligona Y. Kriterij izbora je minimalna vrijednost za  $F_j$ , koja predstavlja udaljenost na zamišljenom dijagramu koji bi imao koordinate  $P_j$  i  $O_j$ :

$$F_j = \sqrt{(1 - P_j)^2 + O_j^2} \quad (7)$$

Tijekom početne usporedbe mogu se odbaciti svi oni materijali za koje su vrijednosti  $P_j < 0,8$ , a za  $O_j > 0,2$  [7].

#### 6.1.4. Metoda utjecajnosti svojstava

U slučajevima kada treba ocijeniti veći broj svojstava, uputno je primijeniti metodu utjecajnosti svojstava. Razmatraju se sva svojstva koja su nam bitna za promatrani slučaj, množi se njihova brojčana vrijednost s odgovarajućim faktorom važnosti ( $B_i$ ) da bi se na taj način odredila relativna važnost svakog pojedinog svojstva u odnosu na neko drugo. Zbrajanjem tako vrednovanih svojstava dobiva se pokazatelj radne karakteristike ( $V_r$ ) koji kasnije služe kao usporedbeni veličina. Materijal s najvećim pokazateljem radne karakteristike smatra se optimalnim za definirane uvjete. No, zbog relativno velikog broja svojstava s različitim mjernim jedinicama uvodi se pojam skaliranja vrijednosti svojstava koji omogućava pretvorbu dimenzijskih u bezdimenzijske vrijednosti. Zbog toga, promatrana se svojstva rangiraju tako da najbolja vrijednost dobiva ocjenu 100, a ostale se rangiraju proporcionalno toj vrijednosti. Ta najbolja vrijednost može biti minimalna ili maksimalna vrijednost u listi, već prema tome kako je usmjeren zahtjev koji je vezan uz dotično svojstvo. Npr., kod troškova, utjecaja korozije, povećanja mase zbog oksidacije i sl. ta bi vrijednost trebala biti minimalna, dok se kod čvrstoće žilavosti u većini slučajeva teži maksimalnoj vrijednosti. U oba slučaja poželjnim (najboljim) vrijednostima svojstava pridružuje se vrijednost 100, a ostale vrijednosti svojstava rangiraju se u odnosu na tu najbolju.

U slučaju kad je najniža vrijednost svojstva najbolja, tj. 100, izraz (8) za skaliranu vrijednost  $S_v$  glasi:

$$S_v = \frac{\text{minimalna vrijednost u listi}}{\text{brojčana vrijednost svojstva}} \cdot 100 \quad (8)$$

dok u slučajevima kad se od svojstva traži maksimum vrijednosti izraz (9) glasi:

$$S_v = \frac{\text{brojčana vrijednost svojstva}}{\text{maksimalna vrijednost u listi}} \cdot 100. \quad (9)$$



U slučajevima kada se svojstva materijala ne ocjenjuju brojčano (npr. kod zavarljivosti), nego procjenom ponašanja materijala (izvrsno, vrlo dobro, dobro, zadovoljavajuće, nezadovoljavajuće) pridružuju im se odgovarajuće brojčane vrijednosti (5, 4, 3, 2, 1), a daljnji postupak je jednak kao i kod razmatranja navedenih svojstava.

Pokazatelj radne karakteristike " $V_r$ " služi za izračunavanje pokazatelja vrednovanja  $M$ , koji je osnovna veličina za rangiranje materijala. Pokazatelj radne karakteristike izračunava se izrazom (10):

$$V_r = \sum_{i=1}^n B_i \cdot S_{vi} \rightarrow \text{maks.} \quad (10)$$

Utvrđivanje faktora važnosti za svojstva često je određeno iskustvo i ponekad iziskuje intuiciju, pa se zato primjenjuje sustavni pristup i to digitalno – logičkom metodom. Tom metodom svako svojstvo uspoređuje se međusobno i pri tome važnijem svojstvu dodjeljuje se 1, a manje važnom 0. Za  $n$  broj svojstava postojat će  $n \cdot \left(\frac{n-1}{2}\right)$  ukupnih pitanja. Faktor važnosti bit će jednak omjeru pozitivnih odluka za promatrano svojstvo i ukupnog broja pitanja.

Pokazatelj vrednovanja  $M$  za promatrani materijal definira se u obliku:

$$M = \frac{V_r}{C \cdot \rho} \rightarrow \text{maks} \quad (11)$$

gdje su:  $C$  – ukupna cijena materijala po jedinici mase,

$\rho$  – gustoća materijala.

Ako materijal mora izdržati neko opterećenje, bolje je razmatrati cijenu po jedinici svojstva, ovisno o načinu i vrsti opterećenja. Tada je:

$$M = \frac{V_r}{C'} \quad (12)$$

gdje je:  $C'$  – cijena po jedinici svojstva.

Ovom metodom mogu se analizirati zamjenski materijali i to izračunavanjem relativnih vrijednosti, pri čemu je:

$$RM = \frac{C_z}{C_j} \quad (13)$$

gdje su:  $C_z$  – cijena po jedinici svojstva za zamjenski (novi) materijal,

$C_j$  – cijena po jedinici svojstva za postojeći materijal.

Zamjenski materijal je pogodniji od postojećeg ako je  $RM > 1$  [7].

### 6.1.5. Metoda graničnih vrijednosti

Pretpostavka primjene ove metode je preslikavanje zahtjeva u tražene granične vrijednosti svojstava materijala, i to kao:

1. donje granične vrijednosti svojstava;
2. gornje granične vrijednosti svojstava;
3. ciljane vrijednosti svojstava.

Hoće li se na određeno svojstvo postaviti donja ili gornja granična vrijednost (tj. minimum ili maksimum) ovisi o željenim karakteristikama koje su određene primjenom, pa se postojeće vrijednosti nazivaju donjim, odnosno gornjim. Tako npr., ako se traži otporan, ali lak materijal, postavlja se donja granica za čvrstoću i gornja za gustoću. Na taj se način mogu eliminirati svi nepogodni materijali iz baze podataka; dakle, oni kod kojih svojstva izlaze izvan postavljenih granica, a preostale treba uključiti u konačnu usporedbu. Zbog toga se metoda graničnih vrijednosti svojstava obično primjenjuje za optimiranje pri izboru materijala i proizvodnih postupaka gdje je relativno velik broj mogućih varijanti. Sužavanjem broja materijala dolazi se do prihvatljivog skupa, pogodnog za daljnju analizu. Nakon analize traženih svojstava, koja su bitna za razmatrani slučaj, svakom se svojstvu pridružuje neki faktor važnosti (digitalno – logičkom metodom) da bi se nakon toga izračunao pokazatelj vrednovanja  $M$  za svaki pojedini materijal. Pokazatelj vrednovanja  $M$  računa se prema izrazu (14):

$$M = \left[ \sum_{i=1}^{n_d} B_i \cdot \frac{Y_i}{X_i} \right]_d + \left[ \sum_{j=1}^{n_g} B_j \cdot \frac{Y_j}{X_j} \right]_g + \left[ \sum_{k=1}^{n_c} B_k \left| \frac{Y_k}{X_k} - 1 \right| \right]_c \rightarrow \min \quad (14)$$

gdje se d, g i c odnose na donju, gornju i ciljanu vrijednost promatranog svojstva:

$n_d, n_g, n_c$  – su brojevi donjih, gornjih i ciljanih vrijednosti svojstava;

$B_i, B_j, B_k$  – su faktori važnosti za donju, gornju i ciljanu vrijednost svojstava;

$X_i, X_j, X_k$  – su donje, gornje i ciljane vrijednosti za razmatrana svojstva materijala;

$Y_i, Y_j, Y_k$  – su specificirane donje, gornje i ciljane vrijednosti svojstava [7].

#### 6.1.6. Pahl-Beitzova metoda ocjena

Pristup vrednovanju je sličan kao kod prethodne metode jer se svojstva također normaliziraju, ali ovdje ocjenama (1 do 5 ili 1 do 10). Za svaki materijal traži se maksimum funkcije cilja, u obliku:

$$F_j = \frac{\sum_{i=1}^n B_i \cdot S_i}{S_{\text{maks}} \sum_{i=1}^n B_i} \rightarrow \text{maks} \quad (15)$$

gdje je:  $S_i$  – ocjena za pojedino svojstvo,

$B_i$  – faktor važnosti za pojedini zahtjev (svojstvo),

$S_{\text{maks}}$  – maksimalna ocjena za pojedino svojstvo,

$n$  – broj kriterija (svojstava).

Razlika u odnosu na prethodnu metodu je u definiranju faktora važnosti za svojstva. Na prvoj razini skupina primarnih zahtjeva (kriterija izbora) dobiva svoje faktore važnosti, čiji zbroj treba biti jednak 1. Na nižim razinama ti se kriteriji pretvaraju u svojstva s pridruženim ocjenama, a svaki kriterij (svojstvo) dobiva svoj faktor važnosti. Zbroj tih faktora važnosti u svakoj skupini mora odgovarati vrijednosti prethodno utvrđenog faktora važnosti za dotičnu skupinu zahtjeva. Ocjene za svojstva izvode se iz podataka za svojstva (u odnosu na ekstremne vrijednosti svojstava raspoloživih materijala) ili se procjenjuju ako to nije moguće [7].

#### 6.1.7. Faktor uporabne valjanosti sveden na troškove

Izbor optimalnog materijala ovisi o tehničkim i ekonomskim utjecajnim veličinama, a usporedba se provodi uvođenjem faktora uporabne valjanosti ( $F_m$ ) svedenog na cijenu, odnosno troškove materijala. Kao i kod drugih metoda, osnova vrednovanja kandidatnih

materijala je usporedba postojećih (X) i traženih (Y) vrijednosti za svojstva. Teži se da zbroj kvocijenata  $X_{ij} / Y_{ij}$  pomnoženih s odgovarajućim faktorom važnosti bude što veći. Iznos troškova ( $C_m$ ) treba biti što manji, a uključuje kako cijenu materijala tako i sve ostale troškove povezane s materijalom – za nabavu, oblikovanje, spajanje i sl. Končan izraz (16) za izračunavanje faktora glasi:

$$F_m = \frac{U_m}{C_m} = \frac{\sum B_i \cdot B_{ij} \frac{X_{ij}}{Y_{ij}}}{\sum C_i} \rightarrow \text{maks} \quad (16)$$

gdje je:  $U_m$  – tehnička valjanost uporabe materijala "m",

$C_m$  – cijena, odnosno troškovi materijala "m",

$B_{ij}$  – faktor važnosti za svojstvo unutar grupe svojstava, za  $i = \text{konst}$  vrijedi

$$\sum_{j=1}^q B_{ij} = 1,$$

$B_i$  – faktor važnosti za grupu svojstava vezanu uz jedan zahtjev

$$\sum_{j=1}^q B_i = 1,$$

$Y_{ij}$  – pojedinačni zahtjev, za  $i = \text{konst}$  vrijedi  $\sum j = q$ ,

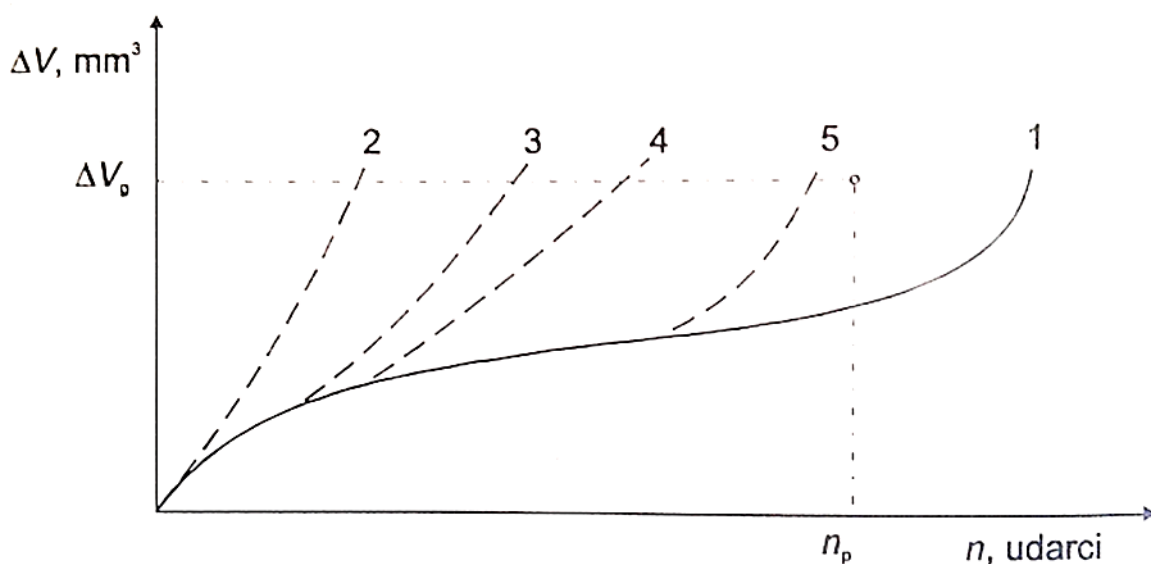
$Y_i$  – grupa zahtjeva, pri čemu vrijedi  $\sum i = p$ ,

$X_{ij}$  – vrijednost svojstva.

Postupak počinje definiranjem zahtjeva i traženih kvantitativnih vrijednosti za svojstva materijala. Svaki zahtjev najčešće obuhvaća nekoliko svojstava  $X_{ij}$ . Ako se navode logički povezani zahtjevi, može se ugraditi pokazatelj vrednovanja koji objedinjuje nekoliko svojstava za isti zahtjev. Svojstvo kojima se ne mogu pridružiti mjere kvantitativne vrijednosti treba stupnjevito ocijeniti. Svakoj skupini ili pojedinačnom zahtjevu pridružuju se faktori važnosti  $B_i$  odnosno  $B_{ij}$ , čije se vrijednosti kreću od 0 do 1. Pri postavljanju zahtjeva treba paziti na njihovu jednaku usmjerenost. Tako npr., ako se traži velika otpornost na pojavu loma od umora i mali gubici topline, tada vrijednost dinamičke izdržljivosti i recipročna vrijednost toplinske vodljivosti moraju biti što više [7].

## 7. ANALIZA ZAHTJEVA

Oplata mlina čekićara zbog velike brzine vrtnje rotirajućeg diska, odnosno kladiva, izložena je velikom udarnom opterećenju. Kod takvog opterećenja prisutan je udarni tip trošenja materijala. Prema [9] najveća opasnost kod tih tribosustava prijeti od preranog umora površine, srednja opasnost od adhezijskog i abrazijskog trošenja, a najmanja opasnost od tribokorozijskog trošenja. Kod takvih tribosustava često se javlja i deformacijsko trošenje (istiskivanje materijala). Strogo gledano, to i nije trošenje materijala budući da nema gubitaka materijala. Ipak, gubitak dimenzija uslijed prekomjerne površinske plastične deformacije može ugroziti funkcionalnost tribosustava. Moguće promjene iznosa trošenja tribosustava s udarnim opterećenjem prikazane su na slici 12.



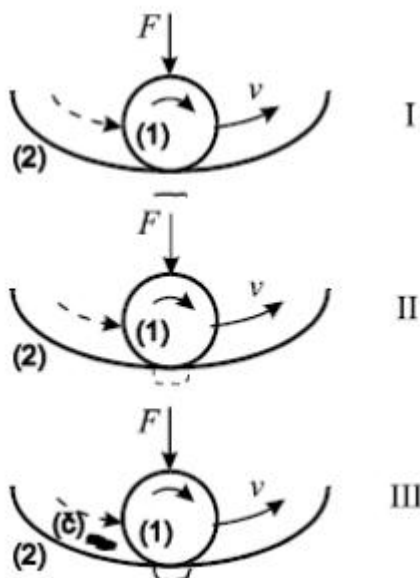
**Slika 12. Moguće promjene iznosa trošenja tribosustava s udarnim opterećenjima [9]**

Krivulja 1 pokazuje prihvatljiv proces trošenja. Nakon početnog, uglavnom deformacijskog trošenja, nastavlja se slabo tribokorozijsko trošenje koje ostaje u zadanim granicama kroz cijelu projektiranu trajnost. Krivulja 2 predočava pojavu adhezijskog trošenja, a krivulja 3 slučaj prekomjernog deformacijskog trošenja. U slučaju prisutnih abrazivnih čestica moguća je pojava abrazijskog trošenja, krivulja 4. Krivulja 5 predočava slučaj preranog umora površine. Tribološke mjere za izbjegavanje procesa opisanih krivuljama 2, 3, 4 i 5 su:

- izbor odgovarajućih materijala,
- zaštita površina od trošenja.

U ovom slučaju posebno je važna zaštita od trošenja zbog teško pomirljivih zahtjeva na žilavost (zbog udarnog djelovanja) i na otpornost ne samo jednom mehanizmu trošenja (umor površine, abrazija, adhezija) [9].

Umor površine je dominantan proces trošenja materijala oplata. Prema definiciji umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprezanja. Na slici 13 prikazan je jedinični događaj umora površine s tri faze.



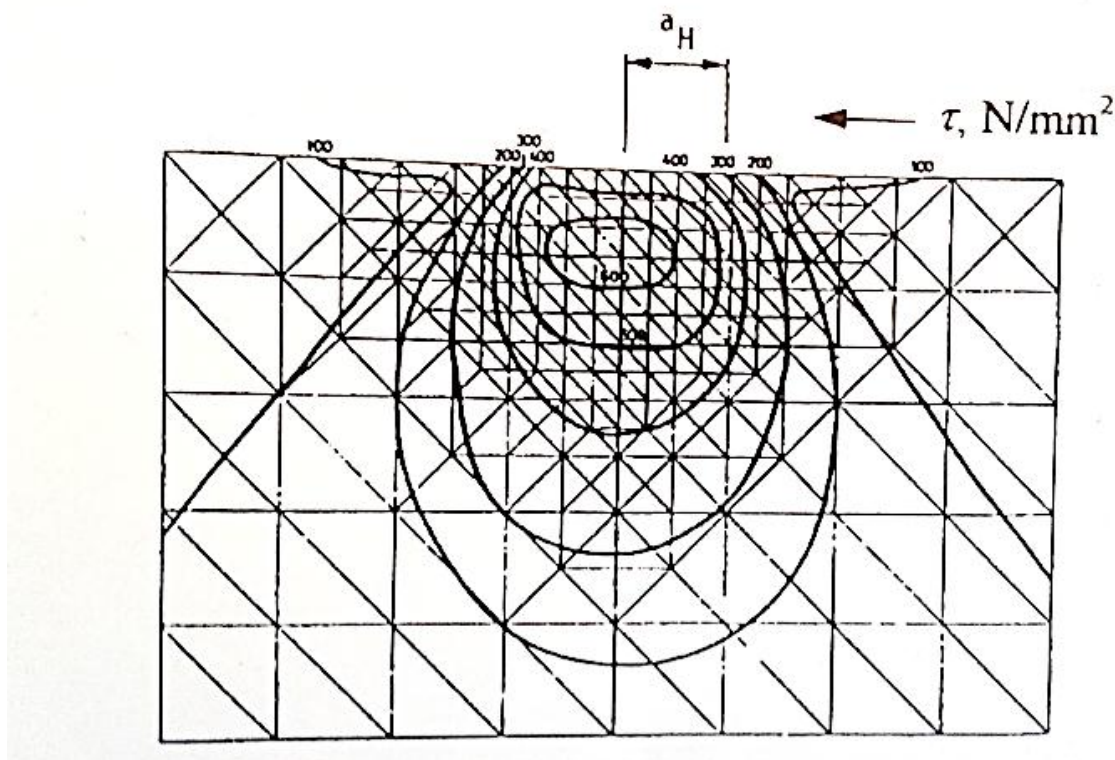
**Slika 13. Jedinični događaj umora površine [9]**

Faza I- stvaranje mikropukotine, redovito ispod površine.

Faza II- napredovanje mikropukotine.

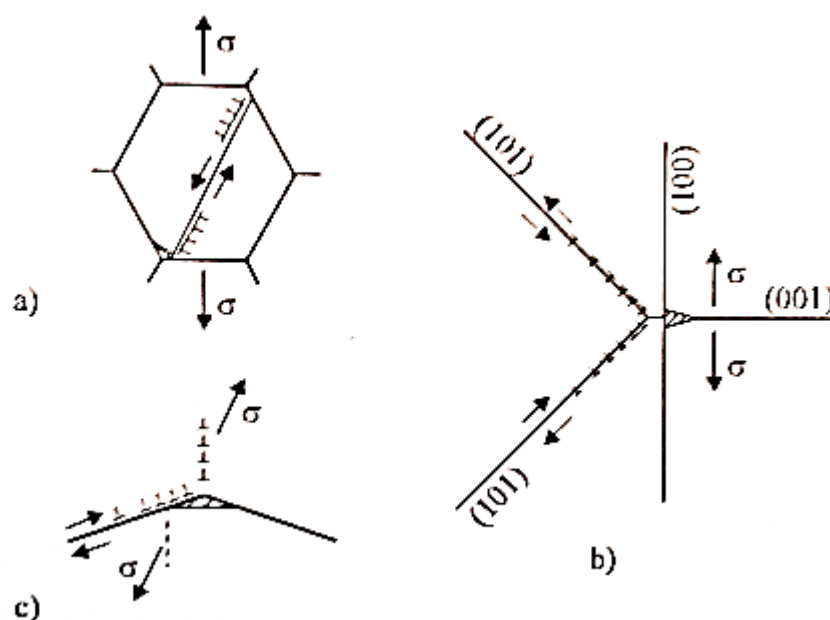
Faza III- ispadanje čestica trošenja, obično oblika pločice ili iverka.

U prvoj fazi nastaje potpovršinska pukotina jer je najveće smično naprezanje kod koncentriranog dodira (tzv. Hertzovo naprezanje) uvijek ispod same površine (slika 14).



Slika 14. Hertz-ovo naprezanje [9]

Ovo je tzv. faza inkubacije jer praktički nema nikakvog odvajanja čestica. U drugoj fazi potpovršinska pukotina izbija na površinu. Od tog trenutka iz pukotine redovito izlaze sitne kuglaste čestice. Ove kuglaste čestice su tako sitne da se praktički ne mogu registrirati kao gubitak mase odnosno volumena, ali mogu poslužiti kao važan pokazatelj stanja procesa trošenja umorom površine. Prema [7] otpornost na širenje pukotina ovisi o umnošku lomne žilavosti  $K_{IC}$  i konvencionalne granice razvlačenja  $R_{p0.2}$ . U trećoj fazi jediničnog događaja umora površine dolazi do ispadanja krupne čestice oblika ivera, što na površini ostavlja oštećenje oblika rupice. Mehanizmi nastajanja prvih pukotina kod umora površine prikazani su na slici 15.



Slika 15. Mehanizmi nastajanja početnih pukotina [9]

Slika 15a) prikazuje gomilanje dislokacija na granicama zrna, slika 15b) međudjelovanje dviju kliznih ravnina, a slika 15c) nastajanje pukotina na malokutnim granicama zrna. Budući da je stvaranje početnih pukotina kod umora površine povezano s procesom gibanja dislokacija, otpornost materijala na umor površine ovisit će o otporu gibanju dislokacija, a na to utječe jako veliki broj čimbenika [9]: potpovršinski koncentratori naprezanja, površinske pogreške, diskontinuiteti u geometriji dodira itd. Otpornost na umor površine naziva se dinamička izdržljivost površine. Ovo svojstvo može se utvrditi samo pokusima.



Općenito, vlačna naprezanja na površini pogoduju pojavi mikropukotina, dok tlačna naprezanja, kao posljedica toplinske obrade (npr. cementiranja ili površinskog kaljenja), hladne ili tople prerade, sačmarenja i sl. smanjuju opasnost od nastajanja mikropukotina te povisuju otpornost na pojavu umora materijala. Vanjski utjecaji na pojavu loma zbog umora materijala su [7]:

- a) konstrukcijom uvjetovano: urezi, poprečni provrti, radijusi zakrivljenosti, utori za klinove itd.;
- b) obradom uvjetovano: tragovi tokarenja, blanjanja, brušenja, prevelika hrapavost, izgorjela mjesta od zavarivanja itd.;
- c) površinska oštećenja od korozije i trošenja, mehanička utisnuća nastala pri montaži i sl.

Lomu od umora materijala pogoduju i nepravilnosti u mikrostrukтури metalnih materijala, kao što su [7]:

- krupnije zrno mikrostrukture daje nižu otpornost pri visokocikličkom umoru – pri temperaturama ispod 200 °C;
- poroznost, viši udio nečistoća, uključci troske i segregacije u strukturi;
- rubna mjehuravost i grafit koji izlazi na površinu;
- nehomogena struktura;
- nehomogeno zakaljena struktura i pojava zaostalog austenita, rubno razugljičenje, pougljičenje, oksidacija i meka mjesta nakon toplinske obrade, nagli prijelazi između površinskih slojeva i osnovnog materijala;
- na mjestimično zakaljenjima lokalitetima u zavaru i oko njega može se pojaviti inicijalna pukotina;
- metalne Cr, Ni ili Cd prevlake i slojevi smanjuju otpornost na umor jer unutar njih mogu nastati mikropukotine...

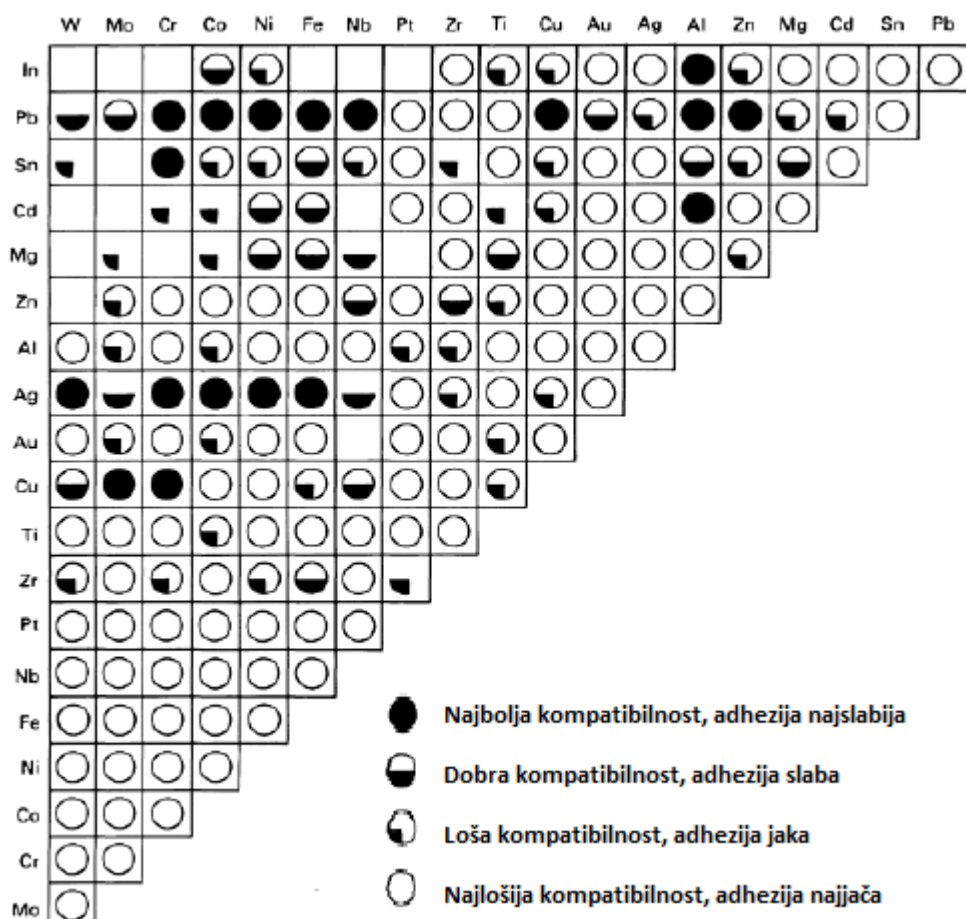
Otpornost na abrazijsko trošenje povezana je s međusobnim odnosom tvrdoća abraziva i materijala trošne podloge, odnosno njegovih strukturnih konstituenata. Taj odnos je odlučujući za prvu fazu jediničnog događaja abrazije, tj. za fazu prodiranja, koja je preduvjet za nastanak početne pukotine, čijim će napredovanjem nastati čestica trošenja. Treba naglasiti da kod materijala koji nisu monofazni nije ispravno kao mjerilo otpornosti na abraziju uzimati tvrdoću dobivenu u uobičajenim metodama ispitivanja (Brinell, Vickers, Rockwell) s

opterećenjima većima od 10 N. Osim tvrdoće, prema [9], na otpornost na abraziju utječe i modul elastičnosti. Prema [7] najdjelotvornije zaštite kod abrazijskog trošenja su:

- boriranje,
- vanadiranje,
- navarivanje.

Na primjer navarivanjem se može nanijeti materijal otporan na trošenje postupkom zavarivanja i time bitno povećati otpornost osnovnog materijala na abrazijsko trošenje.

Osnovni kriterij za ocjenu otpornosti na adhezijsko trošenje materijala tribopara je njihova tribološka kompatibilnost. Budući da se u prvoj fazi adhezijskog mehanizma trošenja uspostavljaju mikrozavareni spojevi, sklonost stvaranju tih spojeva i jakost uspostavljenih adhezijskih veza određivat će otpornost na adhezijsko trošenje. Materijali koji nisu skloni mikrozavarivanju u međusobnom dodiru su tribološki kompatibilni. Tribološka kompatibilnost materijala prikazana je na Rabinowitzovoj karti kompatibilnosti (slika 16).



Slika 16. Rabinowitza karta kompatibilnosti [9]

Za većinu mehanički opterećenih konstrukcija vrlo je važno osigurati kombinaciju dovoljne čvrstoće i žilavosti. Praksa pokazuje da veliki broj lomova nije rezultat prethodne plastične deformacije, nego posljedica nominalnog naprezanja nižeg od granice razvlačenja. Dakle, pojam žilavosti je usko povezan s pojmom loma. Žilavost materijala je svojstvo koje govori o sposobnosti apsorpiranja mehaničke energije od vanjskog opterećenja, uglavnom udarnog, s tim da se materijal prije loma plastično deformira. Količina energije koja se utroši za plastičnu deformaciju i lom jest mjera za žilavost [7].

Analizom zahtjeva utvrđeno je da kod izbora materijala oplata mlina čekićara moramo obratiti pozornost na sljedeća svojstva:

- žilavost,
- zavarljivost,
- otpornost na širenje pukotina odnosno umnožak lomne žilavosti  $K_{IC}$  i konvencionalne granice razvlačenja  $R_{p0,2}$ ,
- modul elastičnosti i
- tvrdoću.

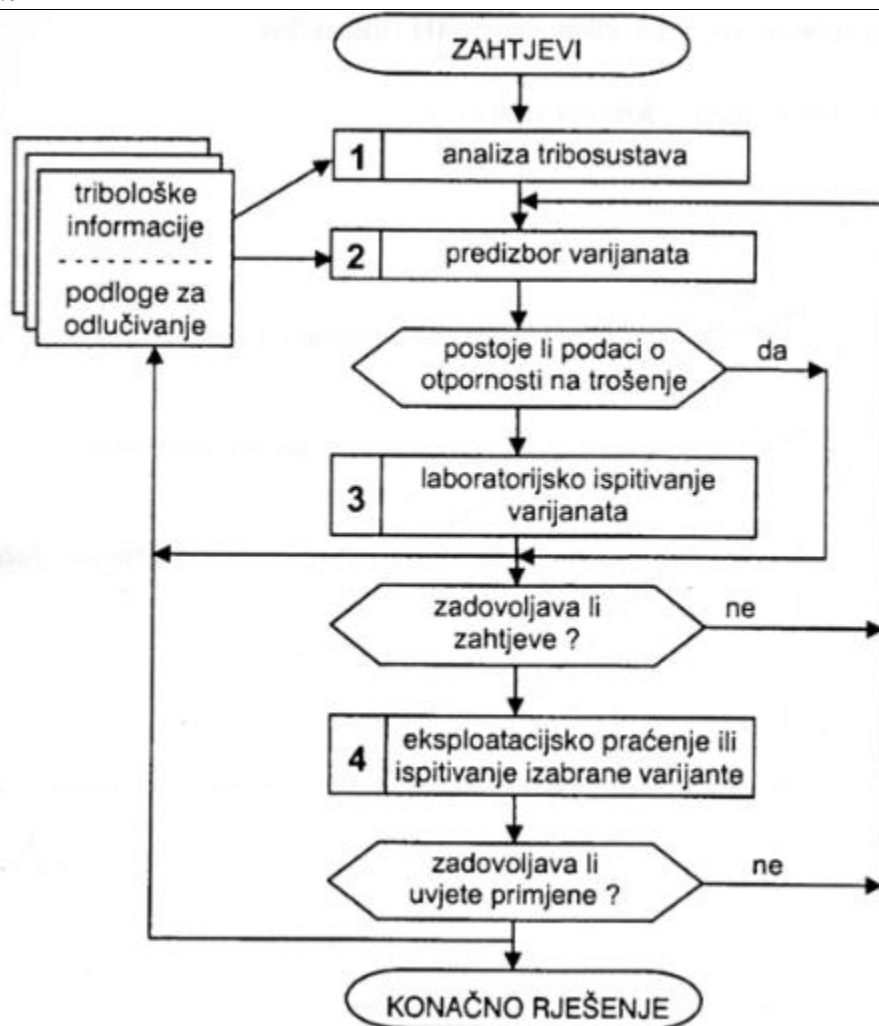
Uz to, poželjno je da materijal ima što nižu cijenu, da ga je moguće modificirati jednim od postupaka oplemenjivanja površine zbog povećanja otpornosti na abrazijsko trošenje. Osim toga potrebno je brižljivo definirati i kontrolirati sastav i strukturu materijala, korektno ga konstrukcijski oblikovati, te obratiti pozornost na nepovoljne utjecaje obrade odvajanjem čestica, zavarivanja, te toplinske obrade i sl. da se postigne što veća otpornost na umor materijala. Budući da EE-otpad sadrži djelove, poput raznih zvučnika, koji su izrađeni od magneta, nemagnetičnost materijala također je poželjna. Ako izabrani materijal nije feromagnetičan, prilikom usitnjavanja neće doći do prijanjanja magnetskih čestica na stijenke oplata zbog magnetskih sila. U sljedećem poglavlju detaljnije su opisana neka najvažnija svojstva.

## **8. ANALIZA SVOJSTVA MATERIJALA ZA KARAKTERISTIČNE ZAHTJEVE I KRITERIJE [7]**

U početnim fazama odabira materijala dolazi se do konkretnih traženih svojstava koja moraju osigurati što pouzdaniju primjenu materijala bez neželjenih pojava. Svaka skupina i podskupina materijala specifično se ponaša u jednakim radnim uvjetima, što ukazuje na nužnost usporedbenog upisivanja posebnosti njihovih svojstava. U ovom poglavlju opisane su neke karakteristike za najvažnija svojstva oplata mlina čekićara navedene u prethodnom poglavlju.

### **8.1. Otpornost na trošenje**

Otpornost na trošenje je jedno od svojstava koje se najteže jednoznačno kvantificira. Zbog toga se materijali, u situacijama trošenja, najčešće biraju pokušavanjem, a temeljem analogije s već poznatim ili sličnim rješenjima. Ovakav pristup rezultira relativno velikim brojem neuspjelih ili suboptimalnih rješenja. Za uspješnu primjenu materijala u uvjetima trošenja nužan je sustavni pristup, primijenjen na načelima tribologije. Postupak izbora optimalnog rješenja, u složenim situacijama, dug je i mukotrpan i sastoji se od nekoliko faza, kako je prikazano dijagramom toka na slici 17.



Slika 17. Dijagram toka izbora materijala za dijelove tribosustava

### 8.1.1. Analiza sustava i procesa trošenja

Slučajevi trošenja svrstavaju se, iz praktičnih razloga, u karakteristične skupine, tipove trošenja. Kriteriji za svrstavanje slučajeva trošenja jesu:

- elementi tribosustava: kruto tijelo – međumedij – kruto tijelo; kruto tijelo – kruto tijelo; kruto tijelo – čestice; kruto tijelo – tekućina + čestice; kruto tijelo – plin + čestice; kruto tijelo – tekućina;
- relativno gibanje: klizanje, kotrljanje, udarci, vibracije, valjanje, strujanje;
- tipovi i mehanizmi trošenja: adhezija, abrazija, umor površine i tribokemijski (pojedinačno i kombinirano).

Za jednoznačno definiranje sustava i procesa trošenja potreban je velik broj podataka do kojih se obično dolazi ispitivanjem, logičkom analizom ili na osnovi analogije s poznatim slučajevima.

### **8.1.2. Predizbor varijanti – izbor mogućih rješenja**

Ovo je najkritičnija faza postupka. Nije dobro težiti što manjem broju varijanti jer se time povećava opasnost od eliminiranja konačnog, optimalnog rješenja. S druge strane, prevelik broj varijanti povisuje troškove sljedećih faza izbora. Sadašnji kriterij za predizbor mogućih rješenja uglavnom su kvalitativni, te stoga prilično nepouzdati. U slučaju postojanja kvantitativnih pokazatelja usporedbe, mogla bi se i izostaviti treća faza u dijagramu toka na slici 17. Za potrebe predizbora materijala varijanti korisno mogu poslužiti dijagramski prikazi područja primjenjivosti materijala za određene uvjete rada – ili druge vrste preporuka iz triboloških priručnika i kataloga.

U ovoj fazi traženja rješenja treba voditi računa i o drugim relevantnim svojstvima materijala, osim otpornosti na trošenje. Od materijala se, prije svega, traži da izdrži mehanička opterećenja u radu bez prekomjerne deformacije, loma ili gubitka nekog funkcijskog svojstva, te da omogući izradu dijelova prikladnim postupcima uz što niže troškove. Kompromis se često postiže tako da se najprije traže oni materijali koji najbolje ispunjavaju ostale zahtjeve, a onda da bi se postigla odgovarajuća otpornost na trošenje eventualno provodi još zaštita od trošenja, postupcima modificiranja površine. To su termokemijski postupci – cementiranje, boriranje, vanadiranje i slični, nanošenje slojeva prskanjem, taloženjem i navarivanjem, površinsko kaljenje ili laserska obrada, kemijsko i fizikalno nanošenje iz parne faze (CVD i PVD postupci) i dr.

Nemogućnost jednostavnog utvrđivanja otpornosti na trošenje, kao svojstva materijala i tribosustava, uvjetovana je time što se svaki proces trošenja događa u mikrosvijetu pa bi odlučujući utjecaj na te procese trebala imati neka svojstva mikrostrukture materijala. Osim toga, svaki proces trošenja se sastoji od nastanka pukotine i širenja (propagacije) pukotine i konačnog otkidanja čestica. Otpornost na širenje pukotine može se donekle karakterizirati primjenom koncepta mehanike loma, iako je utvrđivanje lomne žilavosti ( $K_{IC}$ ) za površinske slojeve praktički neizvedivo. Još je neizvjesnije utvrđivanje otpornosti nastajanju pukotine, jer to svojstvo ovisi više o sustavu i procesu trošenja, nego o samom materijalu. Kako je mehanizam trošenja najbitnija značajka sustava i procesa trošenja, orijentacijski se otpornost

na trošenje može procijeniti prema drugim svojstvima koja dominantno utječu na otpornost i to pri pojedinim mehanizmima trošenja. Ta su svojstva, s mogućnostima zaštite, prikazana u Tablica 2. Čak i da postoje broježani podaci o svojstvima iz tablice 2, otpornost na trošenje se za neki materijal, u konkretnom slučaju, može samo procijeniti. Zato se varijante, u pravilu, moraju dodatno eksperimentalno usporediti i vrednovati.

**Tablica 2. Dominantna svojstva i vrste zaštita za različite mehanizme trošenja**

Osnovni mehanizmi trošenja	Dominantno svojstvo	Djelotvorne zaštite
adhezija	kompatibilnost + otpornost širenju pukotina	nitriranje oksidiranje sulfidiranje
umor površine	dinamička izdržljivost+ otpornost širenju pukotina	cementiranje površinsko kaljenje nitriranje
abrazija	mikrotvrdoća strukturnih faza + otpornost širenju pukotina	boriranje vanadiranje navarivanje
tribokemijski	kemijska pasivnost + otpornost širenju pukotina	fosfatiranje sulfidiranje galvaniziranje

### 8.1.3. Laboratorijska ispitivanja varijanti

U osnovi postoje dvije mogućnosti ispitivanja:

#### 8.1.3.1. Ispitivanje uzoraka

Provodi se na tipiziranim ili standardiziranim uređajima uz pomoć dogovorenih ili propisanih metoda ispitivanja.

#### 8.1.3.2. Ispitivanje gotovih dijelova

Laboratorijsko ispitivanje gotovih dijelova provodi se metodom simulacije na uređajima koji se konstruiraju od slučaja do slučaja. Osobita pozornost posvećuje se postizanju što višeg stupnja sličnosti između modela i stvarne situacije. Kriteriji za ocjenu te sličnosti jesu:

- sličnost ulaza i izlaza;
- sličnost funkcionalne ovisnosti ulaza izlaza;
- sličnost elemenata tribosustava;
- sličnost triboloških interakcija

#### **8.1.4. Ispitivanje izabranih varijanti rješenja u eksploataciji**

Konačna ocjena ispravnosti prije analiziranih varijanti ili konačan izbor, u slučaju kada ni laboratorijska ispitivanja ne daju jednoznačno rješenje, moguć je jedino praćenjem ili ispitivanjem dijelova tribosustava u uvjetima eksploatacije. Iako su tako dobivene informacije najvrednije, ova se ispitivanja rijetko provode. Razlog leži u visokim troškovima takvih praćenja i u teškoćama oko registriranja uvjeta ispitivanja i mjerenja učinka, pa je stoga pouzdanost dobivenih rezultata niska.

### **8.2. Otpornost na krhki lom – žilavost**

Za većinu mehanički opterećenih konstrukcija vrlo je važno osigurati kombinaciju dovoljne čvrstoće i žilavosti. Naime, praksa pokazuje da velik broj lomova nije rezultat prethodne plastične deformacije, nego posljedica nominalnog naprezanja nižeg od granice razvlačenja. Dakle, pojam žilavosti je usko povezan s pojmom loma. Tako su poznati krhki i žilavi lom, odnosno govori se o krhkim i žilavim materijalima. Žilavost materijala je svojstvo koje govori o sposobnosti apsorpiranja mehaničke energije od vanjskog opterećenja, uglavnom udarnog, s tim da se prije loma plastična deformira. Količina energije koja se utroši za plastičnu deformaciju i lom jest mjera za žilavost. Posebno je opasna vrsta krhkog loma karakteriziranog brzim i nekontroliranim širenjem pukotine, bez prethodne plastične deformacije. Na pojavu krhkog loma utječu sljedeći faktori:

- a) konstrukcijsko oblikovanje: urezi, provrti, nagle promjene presjeka, deblostijene konstrukcije i dr.,
- b) proizvodni postupci preko nastajanja površinskih i unutrašnjih pogrešaka i zaostalih naprezanja – urezi, ogrebotine, tragovi brušenja, plinski mjehurići i dr.,
- c) uvjeti naprezanja: udarno opterećenje, višeosno stanje naprezanja (npr. kao posljedica zavarivanja ili postupka deformiranja),
- d) okolni uvjeti: snižene temperature, korozijska oštećenja površine, napetosna korozija, djelovanje vodika, djelovanje tekućih metala i dr.,
- e) sastav i mikrostruktura: krhkom lomu su skloni metali s BCC i HCP rešetkom, ljevačkom mikrostrukturom, grubozrnatom i anizotropnom strukturom, presjeci s površinskim slojevima; ne smireni čelici, prisutnost nečistoća i nemetalnih uključaka, starenje, izlučivanje spojeva po granicama zrna pogoduju pojavi krhkog loma.



Definiranje potrebne razine žilavosti nije lak zadatak pri razvoju konstrukcije i izboru materijala, jer to svojstvo nema jednoznačno fizikalno objašnjenje i broičano usporedbeno iskazivanje – kao npr. čvrstoća, modul elastičnosti i slična svojstva. Čvrste veze i korelacije između žilavosti i ostalih mehaničkih svojstava ne postoje, ali u većini slučajeva materijali više čvrstoće i tvrdoće imaju nižu žilavost i obrnuto. U pravilu žilavost je niža pri nižim temperaturama, većim brzinama deformiranja i pri višim vrijednostima elastičnih konstanti materijala. Većina mjerenih karakteristika žilavosti ne može se rabiti za proračune nosivosti i sigurnosti već su samo usporedbene veličine. Mehanika loma je posljednjih desetljeća znatno pridonijela kvantitativnom opisivanju nastajanja i širenja pukotine te računskoj provjeri sigurnosti konstrukcija koje sadrže pogreške u obliku ureza, šupljina ili pukotina.

Kvantifikacija otpornosti na nastajanje loma provodi se na dva načina:

1. ispitivanjem u uvjetima udarnog opterećenja – pristup preko prelazne temperature,
2. određivanjem veličina iz mehanike loma.

#### **8.1.5. Ispitivanja u uvjetima udarnog opterećenja**

Ispitivanjima u uvjetima udarnog opterećenja dobivaju se sljedeća svojstva i mjerljive veličine za ocjenu žilavosti:

-ispitivanjima u uvjetima udarnog opterećenja dobivaju se sljedeća svojstva i mjerljive veličine za ocjenu žilavosti:

##### **8.1.5.1. Udarni rad loma – KU ili KV**

Udarni rad loma govori o energiji utrošenoj za lom epruvete određenog oblika i dimenzija pri ispitivanju na Charpyjevu batu. Ispitivanje se obično provodi pri normalnoj temperaturi ili pri sniženim temperaturama. Temperaturna ovisnost udarnog rada loma može biti mjera sklonosti krhkom lomu i krhkosti zbog starenja ili popuštanja. Udarni rad loma je potpuno usporedbena veličina i ne može služiti za proračun dijelova konstrukcija. Krhki materijali (sivi lijev, alatni čelici, duromeri) i žilavi, ali koji naginju trenutnom lomu, ispitivaju se primjenom glatkih epruveta bez utora. Specifične veličine koje se utvrđuju glatkim epruvetama, osim udarnog rada loma, su:

- probojna udarna radnja – ispituju se ploče i folije od polimernih materijala. Mjera žilavosti je udarna radnja potrebna za probijanje ili progib ispitnog tijela;
- kut uvijanja pri kojem se javljaju prve pukotine.

#### 8.1.5.2. *Prijelazna temperatura – $T_p$*

U uskoj je vezi s udarnim radom loma. Kako udarni rad loma za većinu metalnih materijala s BCC rešetkom ovisi o temperaturi, to  $T_p$  označava visinu temperature na prijelazu od visokih prema niskim vrijednostima udarnog rada loma. Iznad te temperature može se očekivati žilavo, a ispod nje krhko ponašanje materijala.

#### 8.1.5.3. *Granična temperatura – $T_{50\%}$ ili $T_{85\%}$*

Ispituju se epruvetom s utorom na uređaju s padajućim utegom (Drop Weight Tear Test – DWTT). Mjera žilavosti su granične temperature  $T_{50\%}$  i  $T_{85\%}$  pri kojima zagasiti dio prijelomne površine iznosi 50%, odnosno 85% ukupne površine.

#### 8.1.5.4. *Temperatura duktilnosti – NDT temperatura*

Ispituje se epruvetom s navarom u kojem je urezan utor. Udarno opterećenje ostvaruje se padajućim utegom (Drop Weight Test – DWT). Mjera žilavosti je temperatura (NDT – Nil Ductility Transition), tj. ona najviša temperatura pri kojoj pukotina prodire kroz čitav presjek epruvete. Ispod NDT temperature može se očekivati krhko ponašanje materijala, iako je iznos nominalnog naprezanja niži od granice tečenja.

#### 8.1.6. *Određivanje veličina iz mehanike loma*

Udarni rad loma nije dovoljno selektivna veličina za karakterizaciju žilavosti onih materijala koji imaju postupni prijelaz iz žilavog u krhko ponašanje. To ponajprije vrijedi za visokočvrste čelike i neželjezne metale i njihove legure. Na osnovi linearno – elastične mehanike loma definirano je jedno od ključnih svojstava materijala – lom na žilavost (pukotinska žilavost)  $K_{IC}$ . To je kritična veličina faktora intenzivnosti naprezanja na vrhu postojeće pukotine kod koje počinje njeno nestabilno širenje, a vrijedi za jednostavno otvaranje pukotine cijepanjem, tj. razdvajanje ploštine presjeka simetrično u odnosu na prvobitnu ravninu pukotine (I. način otvaranja pukotine), u uvjetima statičkog rasteznog opterećenja. Vrijednost lomne žilavosti omogućava računanje kritičnog naprezanja (preostale trajnosti), odnosno sigurnosti od loma statički opterećenih dijelova konstrukcija, uzimajući u

obzir pogreške u materijalu nastale tijekom izrade ili uporabe. Posebnu primjenu u tom smislu nalazi ova vrijednost za proračun tlačno opterećenih spremnika, cjevovoda, nosivih građevinskih konstrukcija, dijelova zrakoplova i sl. Vrijednost  $K_{IC}$  može poslužiti za proračun kritične veličine pogreške (pukotine), ali i za provjeru pouzdanosti konstrukcije uz poznatu veličinu pogreške i naprezanje, prema izrazu (17):

$$K_{IC} = \alpha \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad (17)$$

gdje je:  $\alpha$  – korekcijski faktor za geometriju i položaj pukotine

$\sigma$  – naprezanje

$a$  – duljina ureza na površini ili  $\frac{1}{2}$  duljine mikropukotine unutar materijala.

Maksimalna veličina pogreške izračunava se iz izraza (18):

$$a = [f^2 / (\pi \cdot \alpha^2)] \cdot [K_{IC} / R_{p0,2}]^2 \quad (18)$$

gdje je:  $f$  – omjer granice razvlačenja i radnog naprezanja.

Dakle, usporedba materijala na osnovi tolerirane veličine pogreške proizlazi iz omjera  $K_{IC}/R_{p0,2}$ . Što je taj omjer viši, to se tolerira veća (duža) pukotina, odnosno pogreška u mikrosrtukturi materijala, pri definiranim konstrukcijskim faktorima. Ako postoji pogreška u materijalu, uobičajeni pristup s pomoću faktora sigurnosti i dopuštenih naprezanja nije prihvatljiv za proračun nosivosti i sigurnosti djelova, naročito za visokočvrste materijale – osjetljivije na urezno djelovanje. Klasični pristup provjeri sigurnosti naročito je neprikladan ako se prilikom rada očekuju pojave nekog (ili svih) utjecaja:

- zaostala naprezanja od zavaivanja, toplinske obrade i sl.
- niska radna temperatura i/ili udarno opterećenje
- velike dimenzije dijela
- promjenjivo opterećenje
- agresivno djelovanje okoline.

Da bi se shvatili razlozi primjene koncepta mehanike loma treba detaljnije analizirati primjer u kojem se uspoređuje ponašanje dvaju čelika različite  $R_m$  i  $K_{IC}$ , tj. različite osjetljivosti na urezno djelovanje. Čelik A je visokočvrst i ima nižu  $K_{IC}$  u odnosu na čelik B. Čelik A bi bio bolji u slučaju nepostojanja pogrešaka bilo koje vrste i porijekla – zaostala naprezanja, površinske ureze i ogrebotine i sl. Budući da nema savršenih struktura materijala, treba zaključiti da je u nekim situacijama stvarno opasnije primijeniti čelik visoke čvrstoće.

Kao dokaz o tome i o neprikladnosti projektiranja na osnovi dopuštenih napreznja navodi se sljedeći primjer:

Ploča izrađena od čelika:

A) 40 NiCrMo 6 (AISI 4340);  $R_{p0,2} = 1500 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_m = 2000 \text{ N/mm}^2$  i  $K_{IC} = 1265 \text{ N/mm}^{3/2}$ ,

B) 30 CrNiMo 8;  $R_{p0,2} = 1000 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_m = 1350 \text{ N/mm}^2$  i  $K_{IC} = 3200 \text{ N/mm}^{3/2}$ ,

ima na površini urez (napuklinu) dubine 1,5 mm. Izračunati kritična napreznja koja izazivaju lom ploče za jedan i drugi čelik.

Kritično napreznje izračunava se s pomoću izraza (19):

$$\sigma_{kr} = \frac{K_{IC}}{(1,12 \cdot \sqrt{\pi \cdot a})} \quad (19)$$

$$\sigma_{kr}^A = \frac{1265}{(1,12 \cdot \sqrt{\pi \cdot 1,5})} = 520 \text{ N/mm}^2$$

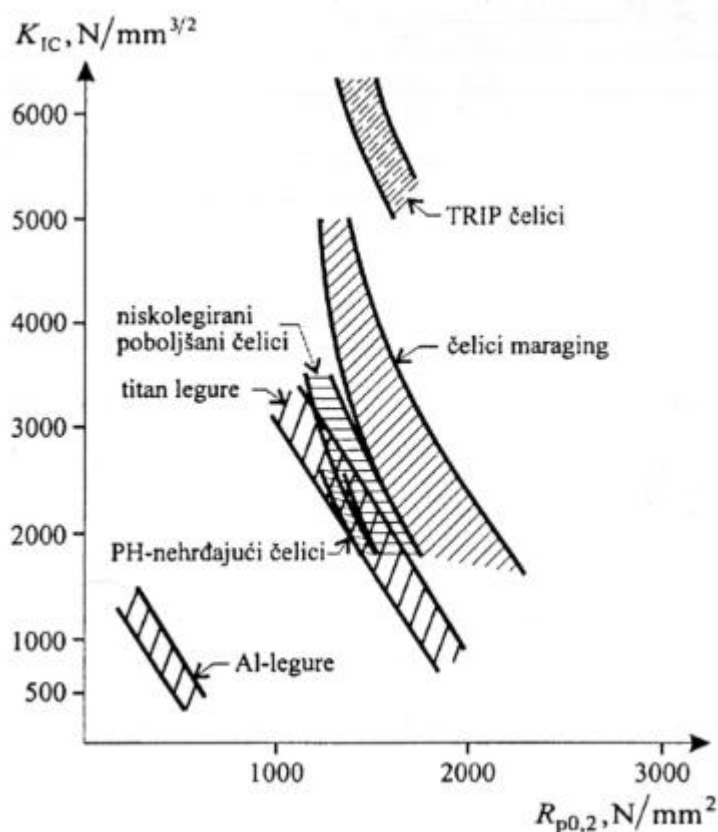
$$\sigma_{kr}^B = \frac{3200}{(1,12 \cdot \sqrt{\pi \cdot 1,15})} = 1320 \text{ N/mm}^2$$

Dakle, omjer  $\sigma_{kr}^B / \sigma_{kr}^A = 2,77$  govori da žilaviji čelik ima znatno više dopušteno kritično napreznje u radu, praktički jednako granici razvlačenja. Prema izrazu (18) omjer  $K_{IC} / R_{p0,2}$  govori o veličini dopuštene pogreške. Tako npr. visokočvrsti čelici mogu imati vrlo malu dopuštenu duljinu pogreške, pa će biti vrlo osjetljivi na njezinu propagaciju, naročito u uvjetima vlačnog opterećenja.

U ovom slučaju  $(K_{IC} / R_{p0,2})^A = 0,84$  i  $(K_{IC} / R_{p0,2})^B = 3,2$ , tj. dopuštena veličina pogreške kod čelika B bit će nekoliko puta veća nego kod čelika A, za jednak oblik i položaj pogreške i jednak omjer radnog napreznja i granice razvlačenja. Premala pogreška u jednom slučaju primjene ne znači da ona nije prihvatljiva nekom drugom slučaju primjene. Ako je npr. kritična duljina pogreške u spremniku pod tlakom manja od debljine stijenke, moguć je nagli lom, ali ako je veća od debljine stijenke to nije moguće jer nema dovoljno materijala za brzi rast pukotine. Dakle, kod žilavijih materijala prije će doći do plastičnog širenja pukotine i do propuštanja spremnika, nego do katastrofalne eksplozije.

Osim o naprezanju, obliku i dimenzijama pukotine, a kod istog materijala,  $K_{IC}$  varira u ovisnosti o sastavu i mikrostrukturi materijala. Vrijednosti za  $K_{IC}$  bitno se razlikuju za pojedine skupine i podskupine materijala (od 20 za neojačane polimere do  $13\,000\text{ N/mm}^{3/2}$  – za nelegirane čelike) te predstavljaju selektivni kriterij za razlikovanje njihove žilavosti. Žilavim se materijalom smatra onaj čija je vrijednost  $K_{IC}$  veća od  $1900\text{ N/mm}^{3/2}$ .

U pravilu, što je viša granica razvlačenja, to je niža lomna žilavost nekog materijala (slika 18). Unutar iste skupine materijala dobivaju se različite vrijednosti  $K_{IC}$ , kao rezultat razlika u sastavu i mikrostrukturi. Tako npr. čelik poboljšan na različite razine čvrstoće ima različite vrijednosti lomne žilavosti.



**Slika 18. Ovisnost lomne žilavosti i konvencionalne granice razvlačenja za neke skupine metalnih materijala**

Svaka od osnovnih skupina materijala specifično se ponaša, pa to upućuje na detaljnije opisivanje utjecaja na njihovu žilavost.

### 8.1.7. Žilavost metala

Visokožilave legure su one koje posjeduju relativno visoku otpornost na pojavu inicijalne pukotine i njezino širenje do potpunog loma pri radnoj temperaturi, pod statičkim ili dinamičkim opterećenjem ili pod uvjetima ravninskog naprezanja ili ravninskih deformacija, s urezom ili bez njega, ili nekog drugog uzroka pojave koncentracije naprezanja. Tražene karakteristike za metalne materijale općenito su:

- a) bez utisnuća na površini, korozijskih ili elektrolučnih jamica, dubokih ogrebotina ili utisnuća i raspuknuća od ograde odvajanjem čestica;
- b) nizak udio vodika ili drugih nečistoća;
- c) mikrostruktura bez krupnih nemetalnih uključaka;
- d) što sitnije zrno;
- e) što viša zaostala tlačna naprezanja u površinskim slojevima;
- f) jednolik kemijski sastav po presjeku;
- g) prijelazna temperatura žilavosti mora biti ispod minimalne radne temperature.

Tražene karakteristike nelegiranih i niskolegiranih čelika:

- a) potpuno smireni Ni-Mo ili Ni-Cr čelici s niskim udjelom ugljika i odgovarajućom razinom čvrstoće;
- b) visokopopuštena martenzitna mikrostruktura s odgovarajućom vrijednošću čvrstoće;
- c) legiranje s Mo da se spriječi krhkost popuštanja;
- d) sitnije zrno.

Tražene karakteristike visokolegiranih čelika:

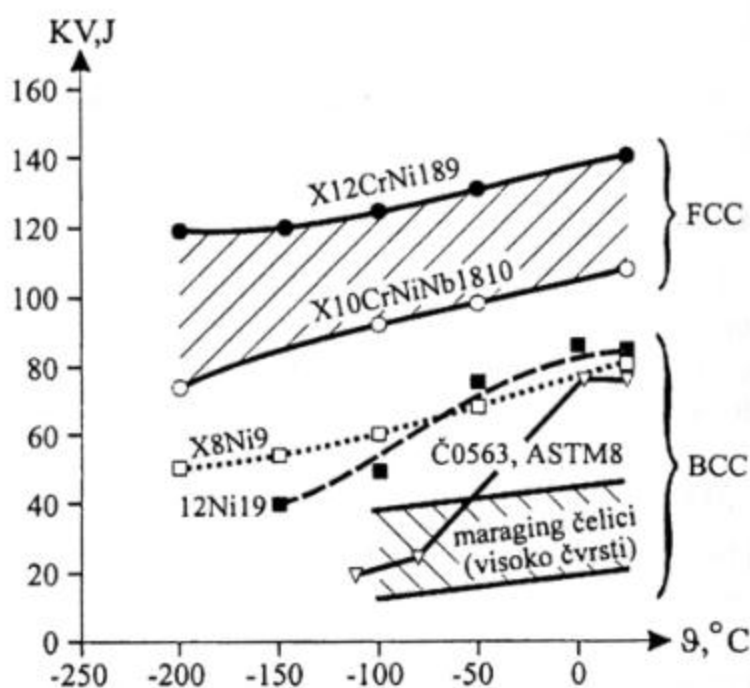
- a) popuštena martenzitna struktura, s umjereno visokim udjelom Ni i niskim udjelom C za primjenu pri vrlo niskim temperaturama (ispod 0 °C), ili;
- b) marage struktura s vrlo visokim udjelom Ni (17...19 %) i vrlo niskim udjelom C (manje od 0,03 %) za primjenu pri niskim temperaturama, ili;
- c) austenitna struktura Cr – Ni čelika s niskim udjelom C za primjenu koja zahtijeva visoku korozijsku postojanost i visoku žilavost, ili;

- d) austenitna struktura s visokim udjelom Mn i C za primjenu koja zahtjeva visoku otpornost na trošenje i visoku žilavost.

Tražene karakteristike čeličnog, kovkastog (temper) i nodularnog (žilavog) lijeva:

- a) dovoljan udio Si da kompenzira brzo ohlađivanje površinskog sloja;
- b) nizak udio P i S;
- c) prisutnost grafita u jednolikoj raspodjeli kuglica, čvorića ili listića (lamela);
- d) feritna struktura i
- e) legiranje s Ni.

Prijelaz iz žilavog u krhko područje za materijale visoke čvrstoće i metale s FCC rešetkom nije izražen. Zbog toga se austenitni čelici i druge legure s FCC rešetkom (npr. Al, Cu i Ni) mogu primijeniti i pri vrlo niskim temperaturama. Čelici s nižom čvrstoćom imaju izraženu prijelaznu temperaturu, dakle vidljiv prijelaz iz žilavog u krhko područje (slika 19).



Slika 19. Utjecaj temperature na udarni rad loma različitih čelika

### **8.1.8. Žilavost polimernih materijala**

Udarni rad loma polimernih materijala bitno ovisi o temperaturi i vlažnosti okolne atmosfere kao i načinu pripreme i obrade epruvete. Veličina ureza bitno mijenja položaj i tijek krivulje udarne radnje loma u ovisnosti o temperaturi. U pravilu, plastomeri imaju veću žilavost od duromera. Općenito, neojačane vrste imaju manju žilavost od ojačanih, a manju i od većine metalnih materijala. Duža kontinuirana staklena vlakna daju više vrijednosti udarnog rada loma od kraćih. Načini povišenja žilavosti polimera jesu:

- dodavanje osnovnom polimeru drugi faza veće žilavosti - npr., to su poliamidi kojima su dodani poliolefini, kombinacija polikarbonata i polibutilena (odbojnici automobila) ili kombinacije akrilonitril – butadien – stirena (ABS) s kristaliničnim i amorfnim polimerima;
- kopolimerizacija u cilju dobivanja žilavije strukture. Koristi se, npr., za povišenje žilavosti polikarbonata pri niskim temperaturama;
- ojačanje vlaknima povišene žilavosti – novije vrste polimernih vlakana, kao npr. PET – poli (etilen – tereftalat), poliamid i polietilen zamjenjuju dio staklenih vlakana kod prešanih poliesterskih smola za automobilske dijelove.

Linearno-elastična mehanika loma teško se primjenjuje na polimerne materijale. Razlog je u visukoelastičnosti ovih materijala, orijentaciji lanaca makromolekula i različitosti stupnja umrežavanja. Ipak, mehanikom loma dobivaju se vrijednosti  $K_{IC}$ , ponajprije za polimere ojačane vlaknima.

### **8.1.9. Žilavost konstrukcije keramike**

Žilavost je jedno od najvažnijih svojstava konstrukcijske keramike, odnosno, krhkost je osnovno ograničenje u primjeni pa se istraživanja usmjeruju na povišenje otpornosti na lom. Lom keramike je funkcija veličine kritičke pogreške (poroznosti ili pukotine) u strukturi kao i vrijednosti  $K_{IC}$ . Pažljivom proizvodnjom dobivaju se veličine pogrešaka manje od 30  $\mu\text{m}$ , ali i to može biti veće od kritične vrijednosti. Žilavost keramike ovisi o oštećenju površine pa se nastoji postići što manja hrapavost, između ostalog i nanošenjem različitih slojeva. Važan postupak za povišenje žilavosti keramika, ponajprije tipa  $\text{ZrO}_2$ , jest induciranje faznih transformacija u području najvećih naprezanja, pa se energija troši za transformaciju, umjesto za inicijaliziranje i širenje pukotina. Drugi način je uporaba vlakana, pri čemu se



energija od vanjskog naprezanja troši za savijanje i klizanje vlakana te skretanje pukotina. Zaostala naprezanja kao rezultat različitog toplinskog istezanja vlakana i matrice u keramičkom kompozitu rezultira povećanjem žilavosti.

### 8.3. Izbor postupaka zavarivanja

Zavarivanje se definira kao spajanje ili prevlačenje osnovnog materijala primjenom topline i/ili pritiska s dodatnim materijalom ili bez njega. Zona spoja za vrijeme zavarivanja dovedena je u tekuće ili plastično stanje. Svojstva spoja zavara ovise o vrsti osnovnog ili dodatnog materijala te o postupku zavarivanja. Zavarljivost se ne odnosi samo na materijal, već je bitan i postupak zavarivanja sa svim pridruženim parametrima. Poznavajući procese koji se događaju, moguće je definirati veličine vezane uz materijal, te na osnovi njih govoriti o većoj ili manjoj sposobnosti materijala da bude zavaren određenim postupkom.

#### 8.1.10. Zavarljivost metalnih materijala

Zavarljivost materijala omogućuje zavarenoj konstrukciji zadovoljavajuće podnošenje svih opterećenja tijekom uporabe. To svojstvo je uvjetovano materijalom, konstrukcijom, postupkom zavarivanja te zahtjevima iz uporabe (slika 20).



Slika 20. Glavni faktori koji utječu na zavarljivost

Prikladnost materijala za zavarivanje ovisi o njegovu kemijskom sastavu, o mikrostrukturi i o svojstvima. Ugljični ekvivalent –  $C_e$  često se rabi za ocjenu zavarljivosti nelegiranih i legiranih čelika, a utvrđuje se izrazom (20):

$$C_e = \%C + \%Mn/6 + (\%Cr + \%Mo + \%V)/5 + (\%Si + \%Ni + \%Cu)/15 \quad (20)$$

Čelici s  $C_e < 0,35$  ne zahtijevaju predgrijavanje i naknadno žarenje.

Čelici s  $C_e$  od 0,35 do 0,55 često traže predgrijavanje.

Čelici s  $C_e > 0,55$  zahtijevaju predgrijavanje i naknadno žarenje.

Općenito, što je viša zakaljivost čelika, to je niža zavarljivost, jer viša zakaljivost omogućuje nastajanje krhke martenzitne mikrostrukture tijekom ohlađivanja zavara.

Uključaka treba biti što manje, ne smiju biti krhki; poželjni su sitni, globularnog oblika, ravnomjerno raspoređeni i da ne proširuju interval skrućivanja. Vjerojatnost dobivanja ne zadovoljavajućeg zavara kod hladno deformiranih materijala je veća zbog postojanja visokih zaostalih naprezanja. U blizini zavara može doći do rekristalizacije, čime se gubi efekt očvrnuća. Zaostala naprezanja kod toplo deformiranih materijala znatno su niža pa su problemi manje izraženi.

Zavarljivost materijala procjenjuje se ili mjeri na različite načine:

a) opisano, na osnovi vizualnog pregleda: makrografska i mikrografska utvrđivanja pogreški u zavarenom spoju kao što su pukotine, uključci, plinski mjehurići, poroznost i sl.;

b) mjerenjem: ispitivanjem statičkim vlačnim i savojnim opterećenjem, ispitivanjem tvrdoće zavarenog spoja izmjerenim u nizu, ispitivanjem udarni rad loma, mjerenjem veličine pukotine.

Kad se ocjenjuje zavarljivost s obzirom na konstrukciju, treba uzeti u obzir oblik i dimenzije konstrukcije, vrstu i veličinu naprezanja koja će biti nametnuta u praksi, te radnu temperaturu i okolni medij. Kod postupka zavarivanja potrebno je paziti i na pripremu zavarivanja, položaj zavarivanja i naknadnu obradu (toplinska obrada). Svi navedeni faktori uz ekonomičnost, određuju izbor postupka i njihovih parametara. Vjerojatno ne postoji metal koji ne može biti zavaren nekim postupkom. No, rijetko se u zavarenim konstrukcijama primjenjuje materijal koji zahtijeva poseban tretman i složeni proces zavarivanja.

#### **8.1.11. Postupci zavarivanja**

Kod zavarivanja, osim već spomenite i analizirane zavarljivosti, valja voditi računa o sprečavanju ili kontroliranju deformacija, koje nastaju zbog lokaliziranog zagrijavanja i hlađenja prilikom zavarivanja, uporabom. Također se, nakon zavarivanja, provodi i žarenje za smanjenje zaostalih naprezanja. Prilikom izbora postupka zavarivanja i o tim je faktorima potrebno voditi računa jer su oni posljedica samog procesa.

#### **8.4. Cijena materijala**

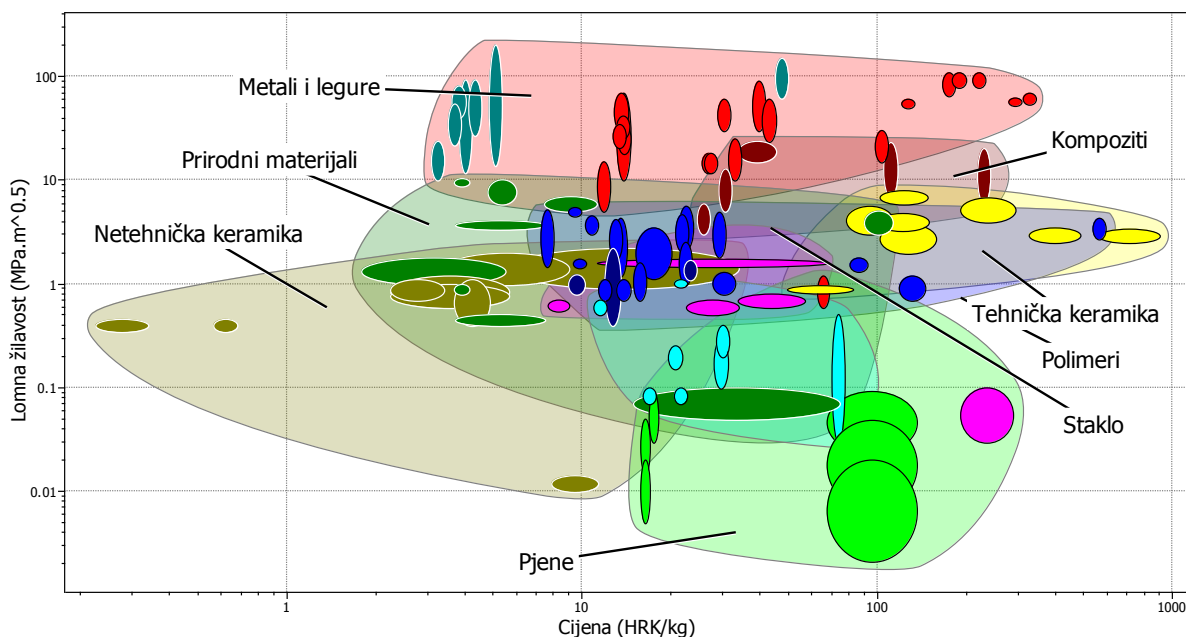
Cijena materijala i ostali troškovi izazvani primjenom nekog materijala nezaobilazan su kriterij u razmatranju optimalnog konstrukcijsko-tehnološkog rješenja proizvoda ili, neovisno, samo pri usporedbi pojedinih skupina ili vrsta materijala. Udio cijene materijala u cijeni proizvoda kreće se od 0,2 do 0,8 ovisno o tipu proizvoda i primjenjenim tehnologijama. Za tipično strojarske konstrukcije, za koje se primjenjuju klasični proizvodni postupci – lijevanje, obrada odvajanjem čestica, kovanje i sl., ovaj udio se kreće od 0,5 do 0,8. Što je konstrukcija masivnija i manje složena to je taj udio veći. U pogledu ukupnih troškova proizvoda, povoljnije je da taj udio bude što veći, što znači da bi troškovi izrade trebali biti što niži. Primjer za takav slučaj je montažni tip proizvodnje, pri kojem se kupuju ugradbeni dijelovi, oblikovani u nekoj drugoj proizvodnji. Bez obzira na to koliki je omjer troškova materijala i troškova izrade nužno je uvijek nastojati sniziti apsolutni i jedan i drugi iznos troškova. Na iznos ukupnih troškova materijala unutar nekog proizvodno-poslovnog sustava, može se djelovati na različite načine:

- smanjenjem mase i obujma ugrađenog materijala,
- primjenom materijala niže gustoće i više čvrstoće,
- smanjenjem osnovne cijene materijala,
- smanjenjem troškova nabave,
- smanjenjem troškova kontrole i ispitivanja,
- smanjenjem troškova transporta i rukovanja,
- smanjenjem zaliha i troškova skladištenja,
- smanjenjem relativnih troškova proizvodnje u odnosu na alternativni materijal te
- smanjenjem troškova praćenja dokumenata i informacija o materijalima.

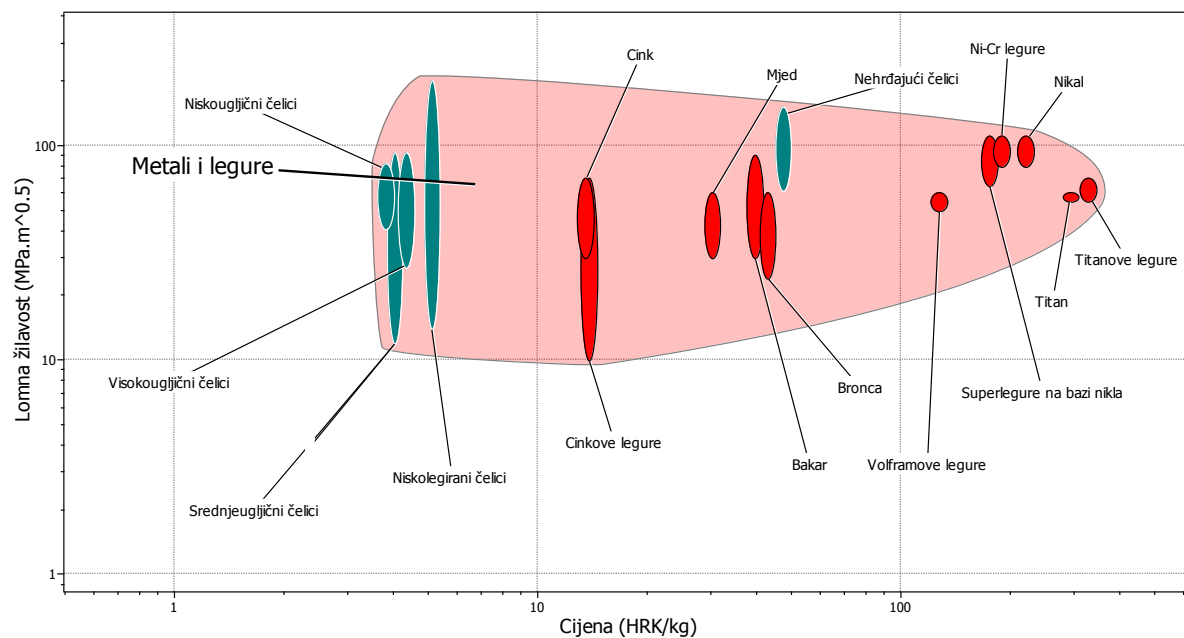
Primjena jeftinijeg materijala ne znači ujedno i dobivanje jeftinijeg proizvoda. Npr., cijena materijala često se odnosi na jedinicu mase pa je nekada ekonomičnije platiti višu cijenu za povišenu čvrstoću jer se na taj način ugrađuje manja količina materijala – tanji presjeci.

## 9. IZBOR MATERIJALA

Predizbor materijala napravljen je pomoću računalnog programa „CES“ (Cambridge Engineering Selector) EduPack 2009. Na slici 21 prikazan je odnos lomne žilavosti i cijene materijala na razini 2. Minimalna vrijednost lomne žilavosti prema [7] treba biti  $K_{IC} > 1900 \text{ N/mm}^{3/2}$  odnosno  $K_{IC} > 60,4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Nakon uvrštavanja minimalne vrijednosti  $K_{IC}$  dobiven je dijagram prikazan na slici 22. Materijali koji zadovoljavaju prvi kriterij pripadaju skupini metala i legura. Od 98 materijala koji se nude u Ces EduPack-u 2009 na razini 2 ovaj kriterij prošlo je njih 16. U tablici 3 nalaze se ti materijali s njihovim vrijednostima lomne žilavosti. Svi ostali materijali, prikazani na slici 23, poput pjena, tehničke keramike, kompozita, polimera itd, ne zadovoljavaju ovaj kriterij te su eliminirani u daljnjem izboru.



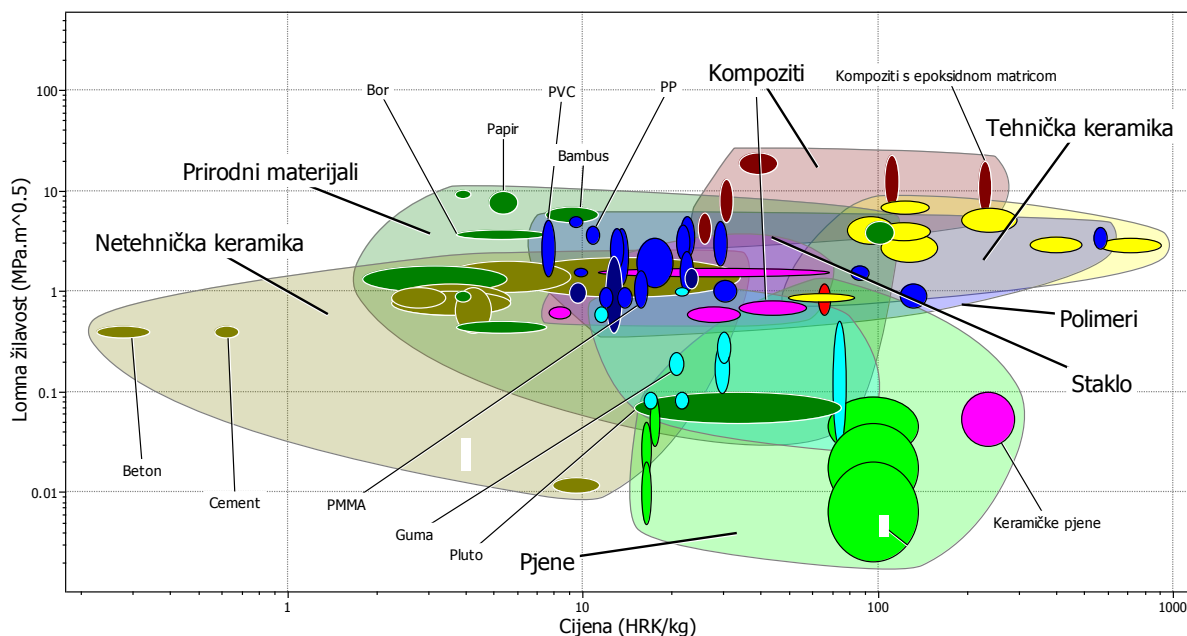
Slika 21. Dijagram lomna žilavost – cijena [10]



**Slika 22. Dijagram cijena – lomna žilavost metala i legura [10]**

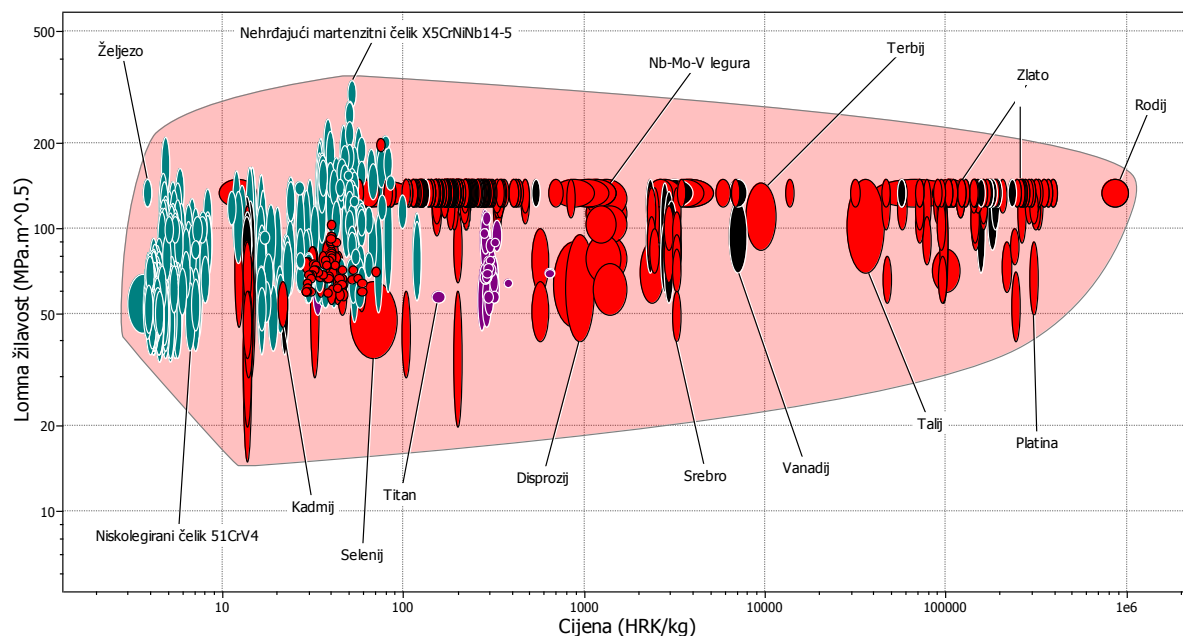
**Tablica 3. Materijali koji su prošli prvi kriterij u Ces EduPack-u 2009 na razini 2 [10]**

Naziv	$K_{IC}$ , MPa m <sup>*1/2</sup>
Cinkove legure	10 - 70
Srednjugljični čelik	12 - 92
Niskolegirani čelik	14 - 200
Bronca	24 - 60
Visokouggljični čelik	27 - 92
Mjed	30 - 60
Cink	30 - 70
Bakar	30 - 90
Niskouggljični čelik	41 - 82
Volframove legure	50 - 60
Titan	55 - 60
Titanove legure	55 - 70
Nehrđajući čelik	62 - 150
Superlegure na bazi nikla	65 - 110
Nikal	80 - 110
Ni-Cr legure	80 - 110

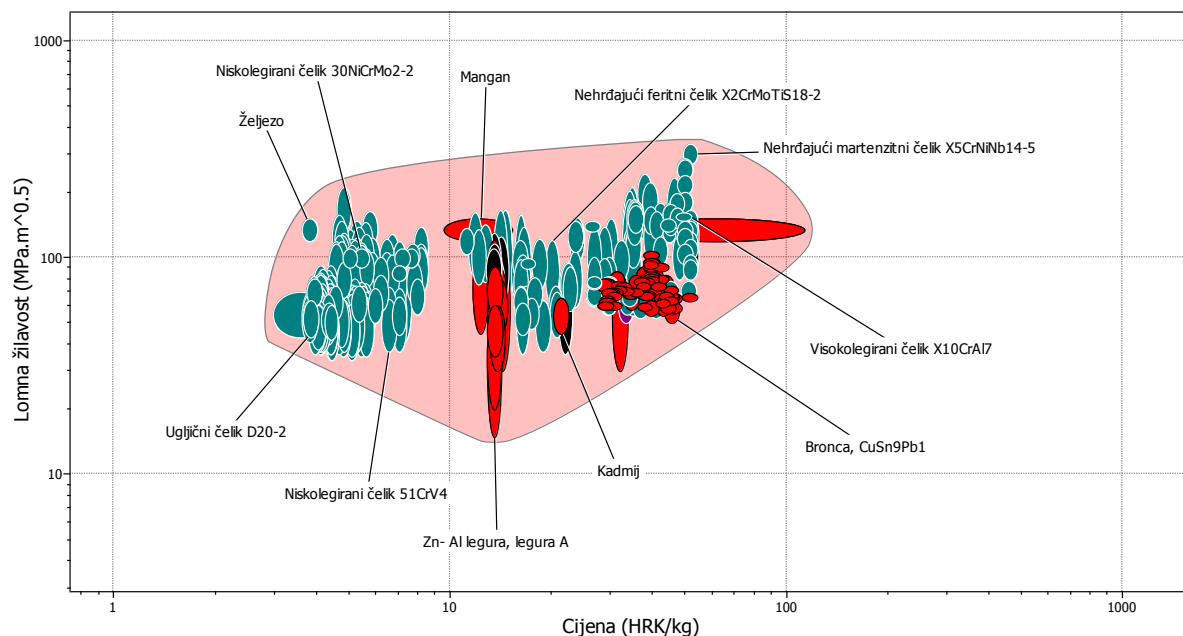


**Slika 23. Dijagram cijena- lomna žilavost materijala koji nisu prošli prvi korak [10]**

U sljedećem koraku uzeti su u obzir samo metali i legure. Na trećoj razini osnovni kriterij prošlo je 869 od 3831 materijala koji se nude u Ces EduPack-u 2009 na razini 3. Na slici 24 su prikazani materijali koji su prošli prvi korak u Ces Edu-Pac 2009 na razini 3. Iz dijagrama cijena - lomna žilavost vidljivo je da postoji veliki raspon u cijeni tih materijala. U izbor su ušli i skupocjeni materijali poput zlata, srebra, rodija, itd. Zbog njihove visoke cijene takvi materijali nisu pogodni za oplata mlina čekićara. Stoga su u sljedećem koraku eliminirani s ostalim materijalima čija cijena prelazi 50 HRK/kg. Ovu eliminaciju prošlo je 431 materijala koji su prikazani na slici 25.



**Slika 24.** Dijagram cijena- lomna žilavost materijala koji su prošli osnovni kriterij u Ces EduPack-u 2009 na razini 3 [10]

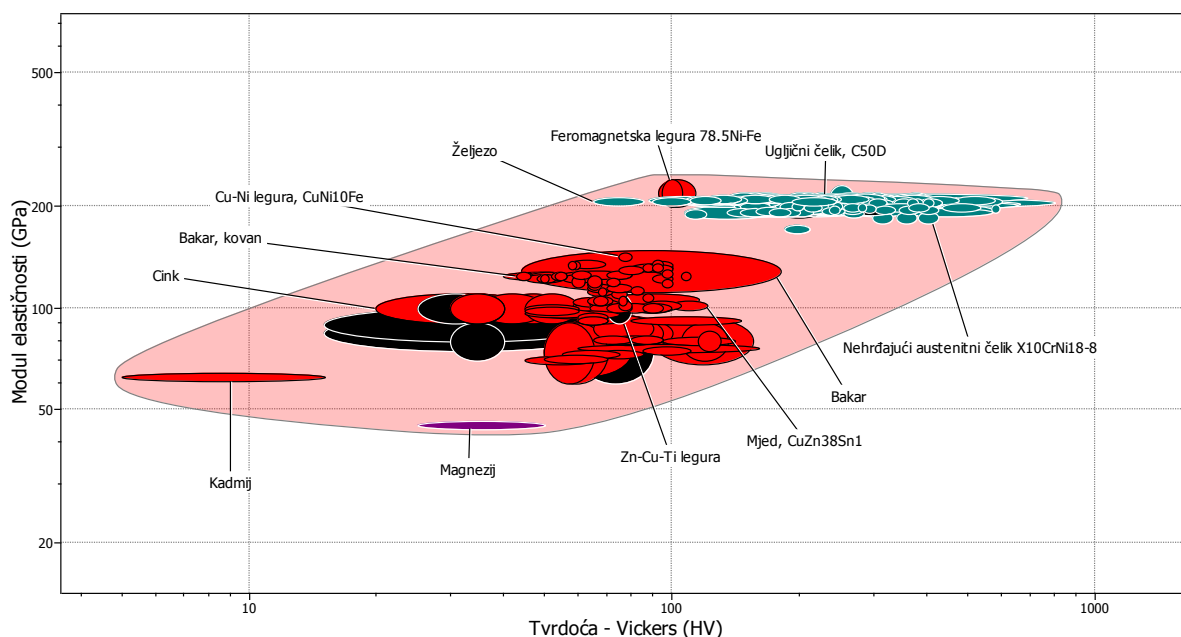


**Slika 25.** Dijagramski prikaz materijala čija je cijena niža od 50 HRK/kg [10]

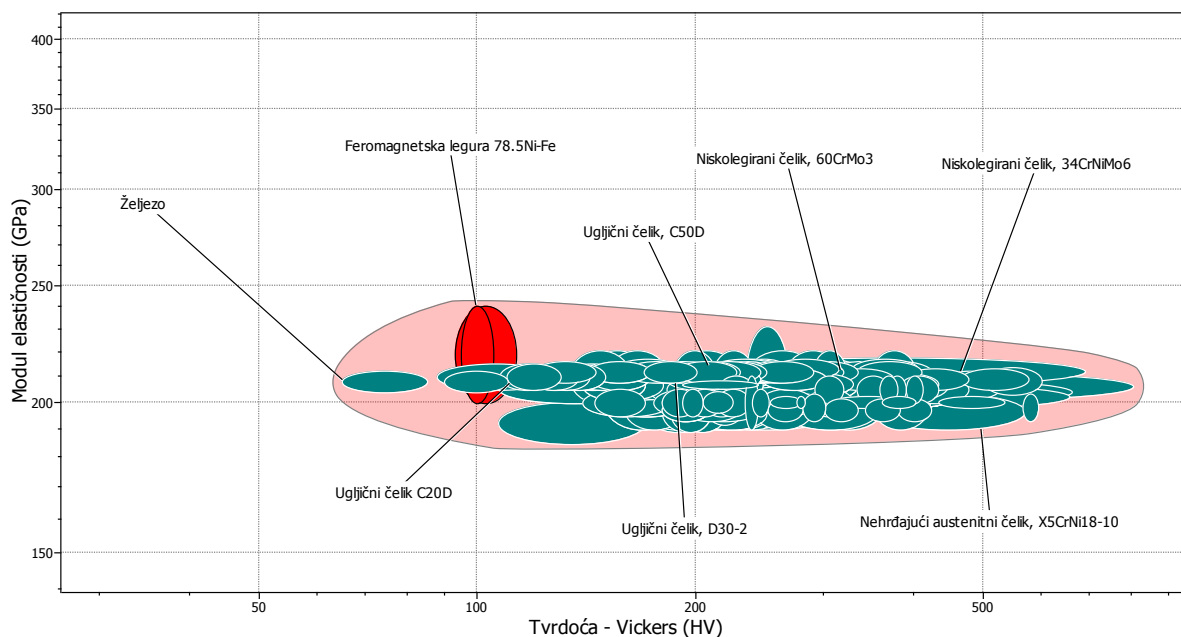
Kao što je ranije navedeno otpornost na abrazijsko trošenje najviše ovisi o tvrdoći materijala i o modulu elastičnosti. Materijali koji su prošli prethodni korak uspoređeni su po tvrdoći i modulu elastičnosti u dijagramu na slici 26. Iz dijagrama je vidljivo da između materijala koji su prošli prethodni korak postoji velika razlika u iznosima modula elastičnosti. Tako npr. magnezij ima najnižu vrijednost modula elastičnosti, svega 45 GPa, dok kod



feromagnetske legure 78.5Ni-Fe modul elastičnosti seže i do 240 GPa. Materijali s niskim modulom elastičnosti nisu pogodni za izbor materijala oplata mlina čekićara. Zbog toga su materijali čija je vrijednost modula elastičnosti niža od 200 GPa (slika 27), poput cinka, bronce, magnezija i sl., eliminirani iz daljnjeg izbora.

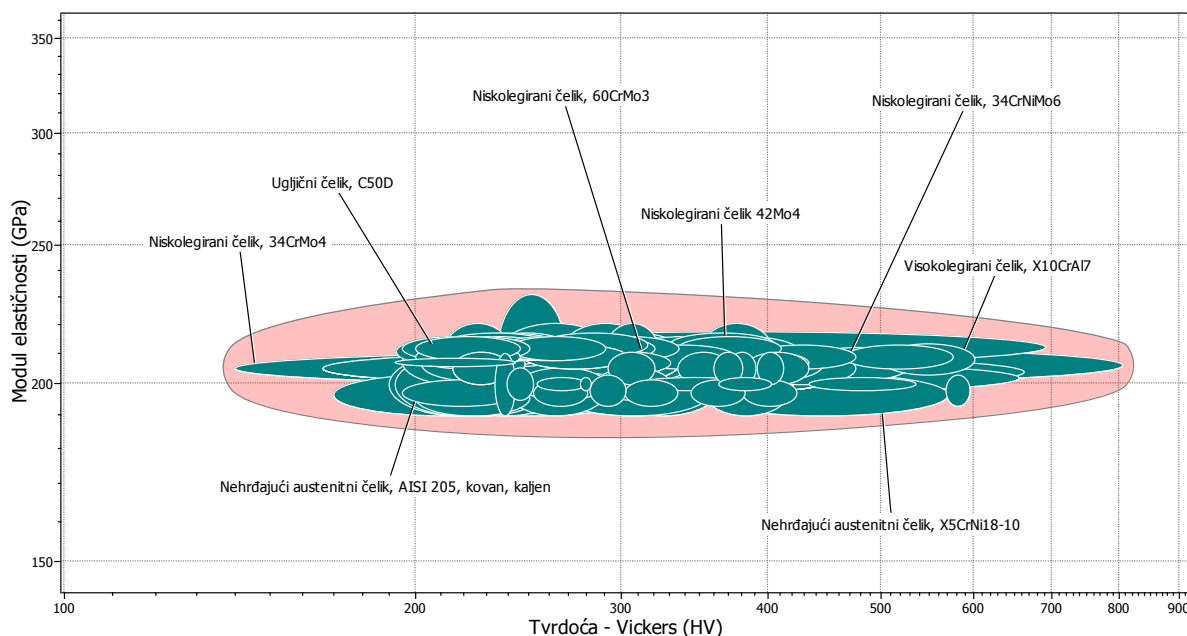


Slika 26. Dijagram tvrdoća- modul elastičnosti [10]



Slika 27. Dijagramski prikaz materijala čija je vrijednost modula elastičnosti veća od 200 GPa [10]

Među materijalima koji su prošli eliminaciju nalaze se i materijali, poput željeza, feromagnetičnih legura, ugljičnih čelika itd., koji imaju relativno nisku tvrdoću. Oplata mlina čekićara mora biti što tvrđa da bi bila otpornija na abrazijsko trošenje. Zbog toga takvi materijali ne bi bili pogodni za izbor materijala. Minimalna vrijednost tvrdoće po Vickersu uzeta je 240 HV. Na slici 28 su prikazani materijali koji zadovoljavaju ovaj kriterij. Ovu eliminaciju prošlo je 184 od 869 materijala.



**Slika 28. Dijagram tvrdoća – modul elastičnosti [10]**

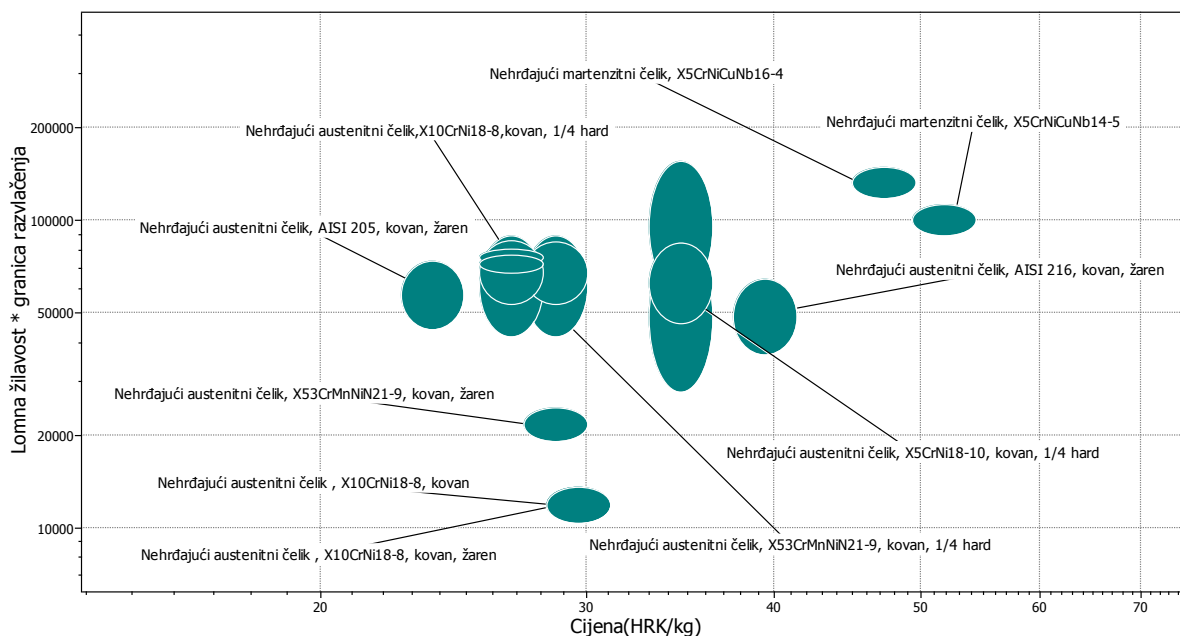
U poglavlju 7 navedeno je da materijal oplate čekićara treba biti nemagnetičan. Prema programskom paketu Ces Edu-Pack 2009 od preostalih 184 materijala samo 16 materijala spada u tu grupu, odnosno svi ostali materijali su feromagnetični i eliminirani su iz daljnjeg izbora. Materijali koji su prošli ovaj kriterij prikazani su u tablici 4.

**Tablica 4. Nemagnetični materijali za daljnji izbor [10]**

Naziv čelika
Nehrđajući austenitni čelik , X10CrNi18-8, kovan
Nehrđajući austenitni čelik , X10CrNi18-8, kovan, žaren
Nehrđajući austenitni čelik, X53CrMnNiN21-9, kovan, žaren
Nehrđajući austenitni čelik, X53CrMnNiN21-9, kovan, 1/2 hard
Nehrđajući austenitni čelik, X53CrMnNiN21-9, kovan, 1/4 hard
Nehrđajući martenzitni čelik, X5CrNiCuNb16-4
Nehrđajući martenzitni čelik, X5CrNiCuNb14-5
Nehrđajući austenitni čelik, X5CrNi18-10, kovan, 1/2 hard
Nehrđajući austenitni čelik, X5CrNi18-10, kovan, 1/8 hard
Nehrđajući austenitni čelik, X5CrNi18-10, kovan, 1/4 hard
Nehrđajući austenitni čelik, AISI 205*, kovan, žaren
Nehrđajući austenitni čelik, X10CrNi18-8,kovan, 1/2 hard
Nehrđajući austenitni čelik, X10CrNi18-8,kovan, full hard
Nehrđajući austenitni čelik,X10CrNi18-8,kovan, 3/4 hard
Nehrđajući austenitni čelik,X10CrNi18-8,kovan, 1/4 hard
Nehrđajući austenitni čelik, AISI 216*, kovan, žaren

\*- nije pronađena europska norma

Otpornost na propagaciju pukotina iskazuje se umnoškom lomne žilavosti i konvencionalne granice razvlačenja. Iz dijagrama na slici 29 je vidljivo da nehrđajući austenitni čelici oznake X10CrNi18-8, kovan, X53CrMnNiN21-9, kovan, žaren te X10CrNi18-8, kovan, žaren vidno odstupaju umnoškom lomne žilavosti i granice razvlačenja od ostalih čelika, pa su eliminirani u daljnjem izboru.



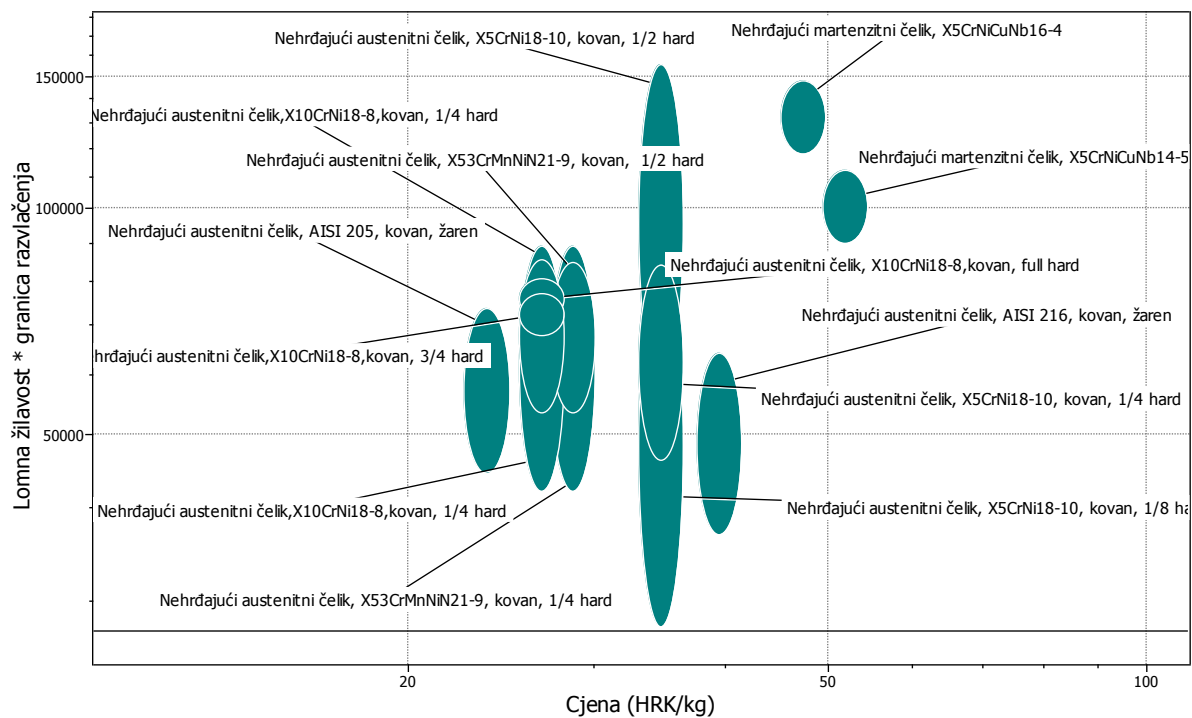
**Slika 29. Dijagram cijena – lomna žilavost \* granica razvlačenja [10]**

Da bi zadovoljili zadnji kriterij izabrani materijali trebaju biti zavarljivi barem jednim od postupaka zavarivanja koji se nude u Ces EduPack-u 2009, a to su:

- TIG zavarivanje (elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina),
- MIG zavarivanje (elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti neutralnog (inertnog) plinom),
- zavarivanje plazmom i
- elektrolučno zavarivanje.

Svi materijali koji su prošli zadane kriterije su odlično zavarljivi barem jednim od postupaka zavarivanja osim nehrđajućih martenzitnih čelika oznake X5CrNiCuNb16-4 i X5CrNiCuNb14-5 koji su prema Ces EduPack-u 2009 po pitanju zavarljivosti ocijenjeni kao vrlo dobro zavarljivi.

Materijali koji su prošli sve zahtjeve prikazani su na slici 30. U tablici 5 i 6 nalaze se vrijednosti odnosno srednje vrijednosti njihovih svojstava.



**Slika 30. Dijagramski prikaz cijena – lomna žilavost \* granica razvlačenja materijala koji zadovoljavaju sve kriterije [10]**

**Tablica 5. Vrijednosti svojstava materijala koji zadovoljavaju sve kriterije [10]**

Oznaka	E, GPa	$K_{IC}$ , MPa.m <sup>0.5</sup>	Zavarljivost	Tvrdoća, HV	$K_{IC} * R_{p0.2}$ , TPa <sup>2</sup> m <sup>1/2</sup>	Cijena, HRK/kg	Nemag.
X53CrMnNiN21-9, kovan, 1/2 hard	190 - 210	65 - 99	odlična	350 - 420	53600 - 84800	27,3-30	da
X53CrMnNiN21-9, kovan, 1/4 hard	190 - 210	70 - 137	odlična	265 - 355	42200 - 89000	27,3-30	da
X5CrNiCuNb16-4	197 - 207	138 - 168	vrlo dobra	250 - 460	118000 - 148000	45-49,5	da
X5CrNiCuNb14-5	197 - 207	83.7 - 102	vrlo dobra	250 - 460	90000 - 112000	49,4-54,3	da
X5CrNi18-10, kovan, 1/2 hard	190 - 203	79 - 209	odlična	350 - 570	58500 - 156000	33-36,3	da
X5CrNi18-10, kovan, 1/8 hard	190 - 203	72 - 203	odlična	170 - 265	27800 - 84000	33-36,3	da
X5CrNi18-10, kovan, 1/4 hard	190 - 203	80 - 137	odlična	265 - 355	46300 - 84000	33-36,3	da
AISI 205*, kovan, žaren	193 - 201	96 - 153	odlična	195 - 245	44500 - 73600	22,6-24,9	da
X10CrNi18-8, kovan, 1/2 hard	193 - 201	65 - 100	odlična	302 - 334	53700 - 85600	25,5-28	da
X10CrNi18-8, kovan, full hard	193 - 201	73 - 82	odlična	381 - 423	71500 - 80800	25,5-28	da
X10CrNi18-8, kovan, 3/4 hard	193 - 201	72 - 81	odlična	344 - 382	68000 - 76900	25,5-28	da
X10CrNi18-8, kovan, 1/4 hard	193 - 201	70 - 137	odlična	252 - 280	42200 - 89000	25,5-28	da
AISI 216*, kovan, žaren	190 - 201	96 - 159	odlična	200 - 250	36900 - 64300	37,5-41,3	da

\*- nije pronađena europska norma

**Tablica 6. Srednje vrijednosti svojstava materijala koji zadovoljavaju sve kriterije [10]**

Oznaka	E, GPa	$K_{IC}$ , MPa.m <sup>0.5</sup>	Zavarljivost	Tvrdoća, HV	$K_{IC} * R_{p0.2}$ , TPa <sup>2</sup> m <sup>1/2</sup>	Cijena, HRK/kg	Nemag.
X53CrMnNiN21-9, kovan, 1/2 hard	200	82	odlična	385	69200	28,65	da
X53CrMnNiN21-9, kovan, 1/4 hard	200	103,5	odlična	310	65600	28,65	da
X5CrNiCuNb16-4	202	153	vrlo dobra	355	133000	47,25	da
X5CrNiCuNb14-5	202	92,85	vrlo dobra	355	101000	51,85	da
X5CrNi18-10, kovan, 1/2 hard	196,5	144	odlična	460	107250	34,65	da
X5CrNi18-10, kovan, 1/8 hard	196,5	137,5	odlična	217,5	55900	34,65	da
X5CrNi18-10, kovan, 1/4 hard	196,5	108,5	odlična	310	65150	34,65	da
AISI 205*, kovan, žaren	197	124,5	odlična	220	59050	23,75	da
X10CrNi18-8, kovan, 1/2 hard	197	82,5	odlična	318	69650	26,75	da
X10CrNi18-8, kovan, full hard	197	77,5	odlična	402	76150	26,75	da
X10CrNi18-8, kovan, 3/4 hard	197	76,5	odlična	363	72450	26,75	da
X10CrNi18-8, kovan, 1/4 hard	197	103,5	odlična	266	65600	26,75	da
AISI 216*, kovan, žaren	195,5	127,5	odlična	225	50600	39,4	da

\*- nije pronađena europska norma

### 9.1. Analiza materijala pomoću metode utjecajnih svojstava

Budući da čak 13 materijala zadovoljava zadane kriterije potrebno je jednom od kvantitativnih metoda pronaći optimalan materijal koji posjeduje najbolju kombinaciju svojstava za oplatu mllina čekićara. Prema [7] u slučajevima kada se treba ocijeniti veći broj svojstava preporuča se primjena metode utjecajnosti svojstava. Ova metoda detaljno je opisana u poglavlju 6.1.4. Metoda utjecajnosti svojstava. Kod spomenute metode najprije se treba odrediti faktor važnosti ( $B_i$ ) svakog zahtjevanog svojstva digitalno- logičkom metodom. U tablici 7 prikazani su dobiveni rezultati. Lomna žilavost i tvrdoća imaju najveći faktor važnosti.

**Tablica 7. Rezultati digitalno-logičke metode za zadana svojstva**

Svojstvo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	Pozitivne odluke	Faktor važnosti
Tvrdoća	0	1	1	1	1	1																5	0,24
$K_{IC}$	1						1	1	1	1	1											6	0,28
Cijena		0					0					0	0	1	1							2	0,095
$R_{p0,2} \cdot K_{IC}$			0					0				1				1	1	1				4	0,19
Zavarljivost				0					0				1			0			0	1		2	0,095
Nemagnetičnost					0					0				0			0		1		0	1	0,05
$E$						0					0				0			0		0	1	1	0,05
Ukupno																						21	1,00

Da bi odredili relativnu važnost svakog pojedinog svojstva u odnosu na drugo množi se skalirana brojčana vrijednost svakog svojstva, dobivena pomoću izraza (8) ili (9), s odgovarajućim faktorom važnosti. Zbrajanjem tako vrednovanih svojstava dobiva se pokazatelj radne karakteristike ( $V_r$ ). U tablici 8 nalaze se izračunate vrijednosti indeksa radne karakteristike  $V_r$ , koji se računa prema izrazu (10), zajedno sa skaliranim vrijednostima svakog svojstva.



**Tablica 8. Izračunate vrijednosti indeksa radne karakteristike  $V_r$** 

Oznaka	Skalirana vrijednost							$V_r$
	E	$K_{IC}$	Zavarljivost	HV	$K_{IC} * R_{p0,2}$	Cijena	Nemag.	
X53CrMnNiN21-9, kovan, 1/2 hard	99	53,6	100	83,7	52	82,9	=	67,3
X53CrMnNiN21-9, kovan, 1/4 hard	99	67,6	100	67,4	49,3	82,9	=	66,8
X5CrNiCuNb16-4	100	100	80	77,2	100	50,3	=	82,9
X5CrNiCuNb14-5	100	60,7	80	77,2	75,9	45,8	=	66,9
X5CrNi18-10, kovan, 1/2 hard	97,2	94,1	100	100	80,6	68,5	=	86,5
X5CrNi18-10, kovan, 1/8 hard	97,2	89,9	100	47,3	42	68,5	=	65,4
X5CrNi18-10, kovan, 1/4 hard	97,2	71,0	100	67,4	49	68,5	=	66,2
AISI 205*, kovan, žaren	97,5	81,4	100	47,8	44,4	100	=	66,6
X10CrNi18-8, kovan, 1/2 hard	97,5	54,0	100	69,1	52,4	88,8	=	64,5
X10CrNi18-8, kovan, full hard	97,5	50,6	100	87,4	57,2	88,8	=	68,8
X10CrNi18-8, kovan, 3/4 hard	97,5	50	100	78,9	54,5	88,8	=	66,1
X10CrNi18-8, kovan, 1/4 hard	97,5	67,6	100	57,8	49,3	88,8	=	65,0
AISI 216*, kovan, žaren	96,8	83,3	100	48,9	38	60,3	=	62,3

\*-nije pronađena europska norma

Pomoću pokazatelja radne karakteristike  $V_r$  izračunava se pokazatelj vrednovanja materijala M izrazom (11). U tablici 9 nalaze se izračunate vrijednosti pokazatelja vrednovanja materijala M za materijale koji su zadovoljili sve kriterije. Prema ovoj metodi najprikladniji materijal za izradu oplata mlina čekićara je onaj s najvišom vrijednošću pokazatelja vrednovanja materijala M, a to je nehrđajući austenitni čelik, AISI 205\*, kovan, žaren.

**Tablica 9. Vrijednosti parametra vrednovanja materijala M**

Oznaka	Cijena, HRK/kg	$\rho \cdot 10^3$ kg/m <sup>3</sup>	V <sub>r</sub>	M
X53CrMnNiN21-9, kovan, 1/2 hard	28,65	7,8	67,3	0,3011
X53CrMnNiN21-9, kovan, 1/4 hard	28,65	7,8	66,8	0,2989
X5CrNiCuNb16-4	47,25	7,86	82,7	0,2232
X5CrNiCuNb14-5	51,85	7,805	66,9	0,1653
X5CrNi18-10, kovan, 1/2 hard	34,65	7,955	86,5	0,3138
X5CrNi18-10, kovan, 1/8 hard	34,65	7,955	65,4	0,2372
X5CrNi18-10, kovan, 1/4 hard	34,65	7,955	66,2	0,2401
AISI 205*, kovan, žaren	23,75	7,8	66,6	0,3595
X10CrNi18-8, kovan, 1/2 hard	26,75	7,8	64,5	0,3091
X10CrNi18-8, kovan, full hard	26,75	7,8	68,8	0,3297
X10CrNi18-8, kovan, 3/4 hard	26,75	7,8	66,1	0,3167
X10CrNi18-8, kovan, 1/4 hard	26,75	7,8	65	0,3115
AISI 216*, kovan, žaren	39,4	7,8	62,3	0,2027

\*-nije pronađena europska norma

## 10. ZAKLJUČAK

Izbora materijala odgovoran je i iznimno složen posao. Zbog sve većeg broja raspoloživih materijala javlja se potreba za sustavnim metodologijama izbora materijala koje se mogu brzo realizirati i koje omogućuju implementaciju računala. Ashbyjevom metodom izbora materijala odnosno uporabom programskog paketa Ces EduPack mogu se brzo usporediti različita svojstva te postavljati ograničenja.

U situacijama kad se od materijala traži otpornost na trošenje važno je dobro odrediti vrstu tribosustava. Kod usitnjavanja EE otpada oplata mlina čekićara konstantno je izložena udarnom tipu trošenja materijala. Najveća opasnost kod takvih tribosustava prijeti od preranog umora površine i abrazijskog trošenja materijala. Odabirom materijala visoke žilavosti i dobre tvrdoće bitno će se povećati otpornost na trošenje u spomenutom tribosustavu.

U ovom diplomskom radu prikazan je proces izbora materijala oplata mlina čekićara za usitnjavanje EE otpada. Upoznavanje s proizvodom je prvi korak kod izbora materijala pri čemu je između ostalog, potrebno voditi računa i o eksploatacijskim uvjetima, te u skladu s tim postaviti sve zahtjeve na materijal. Metodom utjecajnih svojstava određeno je da je najprikladniji materijal za oplatu mlina čekićara nehrđajući austenitni čelik oznake AISI 205, kovan, žaren.

## LITERATURA

- [1] EE otpad – Spectra media, državni koncesionar za recikliranje EE otpada.htm, <http://www.ee-otpad.com/spectra-media.php>, 1.9.2014.
- [2] Zbrinjavanje otpadnih elektricnih i elektroničkih ure aja i opreme (EE otpad).pdf, <http://www.spectra-media.hr/ee-tehnologija-obrade/zbrinjavanje-otpadnih-elektricnih-i-elektronicnih-ure%C4%91aja-i-opreme-EE-otpad.pdf>, 1.9.2014.
- [3] Koharić, V.: *Mehaničke operacije*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1996.
- [4] How does a hammer mill work — Schutte-Buffalo Hammer Mill.htm, <http://www.hamtermills.com/how-does-a-hammer-mill-work>, 3.9.2014.
- [5] Specijalni celici-skripta.pdf, <http://www.simet.unizg.hr/nastava/predavanja/diplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/specijalni-celici>, 12.4.2015.
- [6] Online Materials Information Resource – MatWeb.htm, <http://www.matweb.com/>, 15.4.2015.
- [7] Filetin, T.: *Izbor materijala pri razvoju proizvoda*, Zagreb, 2000.
- [8] Ashby M., Shercliff H., Cebon D.: *Materials Engineering, Science, Processing and Design*, Velika Britanija, 2007.
- [9] Ivušić, V.: *Tribologija*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.
- [10] CES EduPack 2009, Granta Design

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**